ANTICUERPOS MONOCLONALES • EVOLUCION DE LAS PLANTAS

INVESTIGACION y CIENCIA

DICIEMBRE 2001
800 PTA. 4,81 EURO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

ORIGEN Y CUNA DE LA VIDA

- Degeneración macular
- Internet amenazada
- Veinticinco años de física

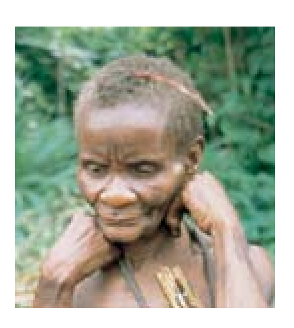


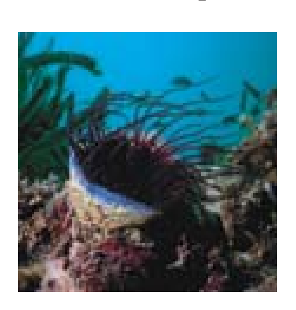


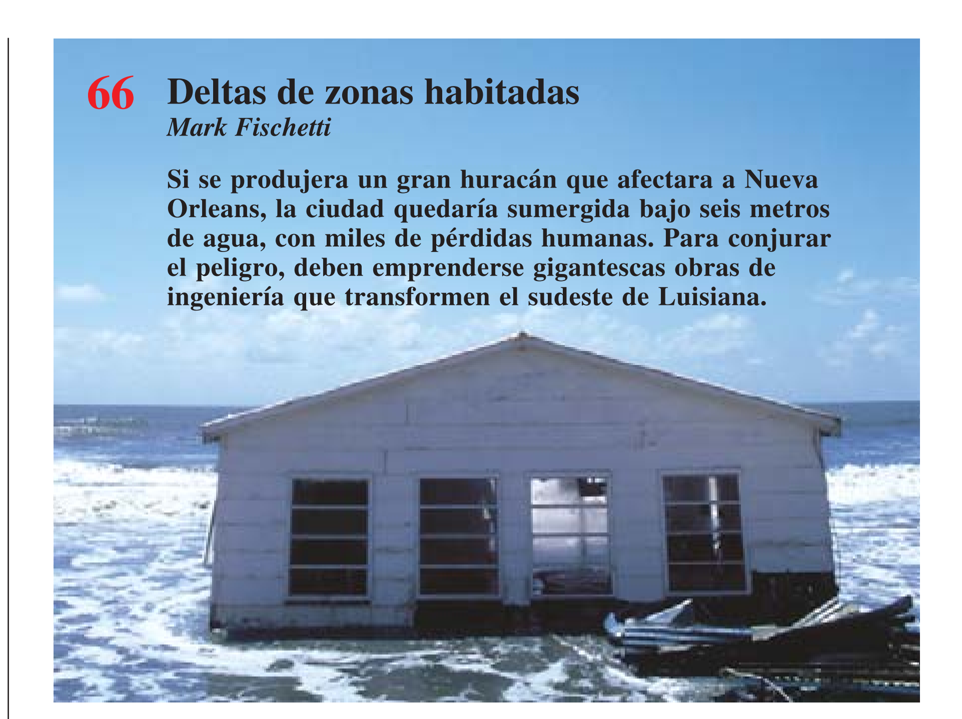
Diciembre de 2001 Número 303

SECCIONES

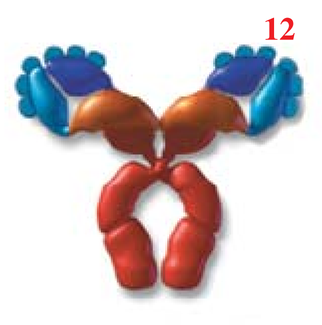


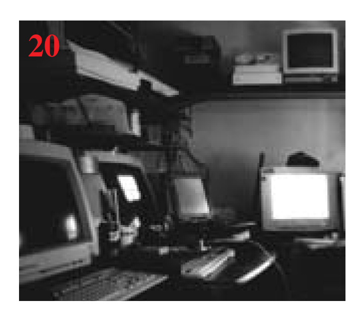












Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES



Portada: NASA y Hubble Heritage Team

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
5	CERN
6	Javier Rodríguez Viejo
7	AIP Emilio Segré Visual Archives
10	Francesc Pi
12-13	Jeff Johnson
15-17	Craig Foster
20-22	Ethan Hill
24	CERT©/Coordination center at the Software Engineering Institute of Carnegie Mellon University
27	Ethan Hill
38-39	NHTSA
41	Delphi Automotive Systems (*arriba*); Ford Motor Company (*abajo*)
42	Xplane.com
43	Visteon
45	David F. Blake y Peter Jenniskens, cortesía de *Science*, vol. 265; 1994, ©AAAS
46	Don Foley
47	Dominic Hart, cortesía de NASA Ames Research Center
50	Imagen alterada por Sara Chen
53	Bryan Christie
54	Jessie Nathans
55	Kevin Langton, Departamento de Oftalmología de la Universidad de Columbia
56	Imagen alterada por Sara Chen
57	Bryan Christie
58	Edward Bell y NASA
61	Don Dixon
62	Sara Chen, fuente: Nuno C. Santos
63	NASA
64	Sara Chen
66-67	Max Aguilera-Hellweg
68-69	Bryan Christie, fuente: L.S.U. (*mapa de fondo*); Don Foley (*mapas de la izquierda*), fuentes: L.S.U. (*inferior*), U.S. Army Corps of Engineers (*centro*); National Geographic Book Division (*sección de Nueva Orleans*); fuente: L.S.U. (*área de detalle*)
71	Bryan Christie, fuentes: U.S. Army Corps of Engineers; L.S.U., Louisiana Water Resources Research Institute
74-78	Fernando Valladares
80-81	Pour la Science
84-85	George Retseck (*ilustración*); Bootstrap Institute (*fotografía de Engelbart*); Deanna Horvath, cortesía de Xerox Parc (*ratón de 1981*), Microsoft (*ratones de 1987 y 2000*) y Logitech (*ratón de 2001*)
91	Matt Collins

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Antonio Celada: *Presente y futuro de los anticuerpos monoclonales*; Luis Bou: *Alerta roja en la Red* y *Aventuras problemáticas*; M.ª Rosa Zapatero: *Hielo y origen de la vida* y *La vida en el universo*; Gilberto V. Rosales: *Degeneración macular*; Juan Pedro Campos: *Deltas de zonas habitadas*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; J. Vilardell: *Hace..., Curiosidades de la química* e *Ideas aplicadas*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
MANAGING EDITOR Michelle Press
ASSISTANT MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORIAL DIRECTOR, ON-LINE Kristin Leutwyler
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Carol Ezzell, Steve Mirsky, George Musser y Sarah Simpson
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Charles McCullagh
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Rolf Grisebach

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44
Fax 93 414 54 13

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	8.800 pta.	16.000 pta.
	52,89 euro	96,16 euro
Extranjero	11.500 pta.	21.500 pta.
	69,12 euro	129,22 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pta. 4,81 euro
Extraordinario: 1.000 pta. 6,01 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18 (Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 91 484 39 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono 93 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 91 409 70 45 – Fax 91 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. 93 321 21 14
Fax 93 414 54 13

Difusión controlada

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

DIVIÉRTASE CON EL NENE. «El bebé humano es un sujeto excelente para pruebas de aprendizaje. Con él no hay que recurrir a horarios de comida ni crear cualquier otro estado de privación, pues el cachorro humano puede recibir afirmaciones psicológicas de los eventos ambientales más triviales, sin que necesite el premio de un alimento. Casi cualquier 'retorno' del medio es reforzante mientras no resulte demasiado intenso. Un elemento de refuerzo al que los bebés suelen reaccionar es el encendido y apagado de una lámpara de mesa. Elija cualquier reacción, levantar la mano, por ejemplo. Siempre que el bebé levante el brazo, haga destellar la luz. Al poco tiempo se habrá generado una reacción perfectamente definida. Por cierto, que el niño se habrá divertido.» —B. F. Skinner, profesor de psicología de la Universidad de Harvard.

SUSTANCIAS FRÍAS. «Los fluorocarburos, una nueva clase de compuestos químicos muy extensa y prometedora, han pasado de los laboratorios a las fábricas. Ya se producen a toneladas en la planta de Hastings, de la compañía minero-metalúrgica Minnesota. La cualidad más notable de la mayoría de los fluorocarburos reside en su estabilidad extraordinaria; resisten al calor, ácidos, álcalis, insectos y hongos.»

BOMBAS NUCLEARES DE CAMPAÑA. «El mes pasado la Comisión de Energía Atómica hizo estallar cinco bombas en su campo de pruebas de Nevada. Los experimentos se proponían recabar información acerca del posible uso táctico de las armas atómicas. En el ejercicio Peña del Desierto, así se bautizaron los ensayos, participaron efectivos del Ejército. En una de las pruebas, 1200 paracaidistas montaron posiciones de combate en el polígono, se retiraron para la explosión y luego retornaron para recibir lecciones sobre cómo descontaminar los pertrechos que habían dejado en el lugar.»

...cien años

NOVA DE PERSEO. «El profesor G. W. Ritchey, del Observatorio Yerkes, acaba de facilitar fotografías de la nebulosa tenue que rodea la nueva estrella de Perseo. La medición del negativo indica que la nebulosa se ha expandido un minuto de arco en siete semanas. La celeridad del movimiento es desde luego enorme, mucho más que cualquiera otra conocida hasta ahora dentro del universo. El movimiento de la fuerte condensación de nebulosidad se acerca *al de la luz*.» —Mary Proctor

COMIDA CON EXOESQUELETO. «Monsieur Dagin, entomólogo francés, recomienda algunos insectos como artículos de dieta. No sólo se ha leído toda la bibliografía sobre gastronomía insectívora, sino que, además, ha probado personalmente varios cientos de especies crudas, cocidas, fritas, gratinadas, asadas y picadas. Ha comido incluso arañas, pero no las recomienda. Las cucarachas, dice, hacen una sopa deliciosa. Wilfred de Fonvielle, otro científico francés, prefiere las larvas, que pueden pelarse y comerse como si fueran camarones.»

BUQUES DE NUEVO DISEÑO. «Hasta ahora la Armada de los Estados Unidos no había construido un buque que desplazara 14.948 toneladas. El 'Georgia' se cuenta entre los tres de la clase Virginia autorizados el 3 de marzo de 1899. El modelo aceptado, que se muestra en la ilustración, fue precedido por una controversia en el Comité de Construcciones Navales, originada por las objeciones a la torreta superpuesta, en la cual los cañones de ocho pulgadas están montados sobre los cañones de doce pulgadas.»



U.S.S GEORGIA, acorazado modelo 1901

...ciento cincuenta años

CAZA DE OSOS. «Un periódico de Montauban (Francia) da cuenta de la captura de un enorme oso empleando cloroformo. Durante mucho tiempo su presencia aterrorizó al contorno. Al amanecer de cierto día, un tal doctor Pegot se acercó con un grupo de campesinos a la caverna donde dormía la fiera. Sobre la entrada tendieron barras de hierro y mantas y el doctor descargó varias veces en el interior de la cueva una jeringa de gran tamaño llena del somnífero. El animal no tardó en caer en un sopor profundo y entonces el doctor se adelantó para hacerse con su trofeo. Es éste el primer caso de captura de un animal salvaje usando cloroformo.»



La física en el último cuarto del siglo XX

Xavier Roqué

En 1977, John van Vleck, Nevill Mott y Philip Anderson recibieron el premio Nobel de Física por sus trabajos teóricos sobre estado sólido. El perfil de los físicos y la especialidad galardonados eran sintomáticos de los cambios que vivía la física. Si en el caso de van Vleck y Mott se reconocía con cuarenta años de retraso a dos pioneros en la aplicación de la mecánica cuántica al estudio de los metales, la inclusión de Anderson, investigador de AT&T y Bell —el gigante de las telecomunicaciones estadounidense— dejaba pocas dudas sobre la relevancia de la investigación industrial para la física contemporánea.

El premio consolidaba asimismo a la física del estado sólido como una de las áreas de la física con mayor proyección, capaz de competir en recursos y prestigio con la física de altas energías, buque insignia de la disciplina en las décadas posteriores a la Segunda Guerra Mundial.

La física del último cuarto del siglo XX iba a estar marcada por una mayor paridad entre las distintas áreas y por el estrechamiento de los vínculos —nada desdeñables al iniciarse el período— con el sector industrial. Es aquí, más que en cualquier revolución conceptual, donde habría que buscar las claves del desarrollo de la disciplina durante este período.

Las teorías de la relatividad y la mecánica cuántica, que proporcionan el armazón básico para comprender el comportamiento de las partículas subatómicas, la luz o las galaxias, datan de la primera mitad del siglo; durante su segunda mitad los esfuerzos de los físicos se centraron en resolver los graves problemas que planteaba la simultaneación de ambas teorías, así como en extender su dominio de aplicación.

El autor

XAVIER ROQUE (Barcelona, 1965) es profesor titular de Historia de la Ciencia en la Universidad Autónoma de Barcelona (UAB) y dirige el Centro de Estudios de Historia de las Ciencias de la misma universidad. Licenciado en físicas, se doctoró en historia de la ciencia (UAB, 1993) con una tesis sobre la historia de la electrodinámica cuántica. Ha realizado estancias postdoctorales en la Universidad de Cambridge (1993-1995) y en el Centre de Recherche en Histoire des Sciences et des Techniques, La Villette, París (1996). Su trabajo se ha centrado en la historia de la física del siglo XX, desde el descubrimiento del positrón a las relaciones entre ciencia e industria en el desarrollo de la radiactividad. Entre sus publicaciones destaca la edición, junto con Manuel García Doncel, de *Las ondas electromagnéticas de Heinrich Hertz* (Barcelona: Publicacions UAB y Edicions UPC, 1990). Recientemente ha traducido y prologado una selección de textos de Einstein sobre la teoría de la relatividad (*Albert Einstein. La teoria de la relativitat i altres textos*, Barcelona: ECSA e Institut d'Estudis Catalans; Vic: Eumo, 2000).

Uno de los primeros éxitos se alcanzó en 1949 con la formulación de la electrodinámica cuántica, una teoría cuántica y relativista de las interacciones electromagnéticas. La capacidad predictiva de la electrodinámica cuántica es hoy proverbial, y ha servido de modelo a otras teorías cuánticas de campo.

De hecho, es tal la confianza que inspiran relatividad y cuántica, que algunos físicos han pronosticado el fin de la física, porque cada vez quedarían menos leyes fundamentales por descubrir. Ya en 1929 Paul A. M. Dirac señalaba que, una vez formulada la mecánica cuántica, los físicos disponían "de las leyes físicas necesarias para matematizar la mayor parte de la física y toda la química", y la única dificultad residual era que la aplicación de estas leyes llevaba "a ecuaciones demasiado complicadas para ser solubles".

La génesis de la mecánica cuántica relativista resultó mucho más problemática de lo que suponía Dirac, pero aun así el éxito de la electrodinámica cuántica llevó en 1965 a Richard Feynman a reiterar la idea del fin de la física con un símil geográfico: "El descubrimiento de una nueva ley tras otra no puede continuar indefinidamente... Somos afortunados por vivir en una época en la que aún quedan cosas por descubrir. Es como descubrir América, sólo puede hacerse una vez. Estamos asistiendo al descubrimiento de las leyes fundamentales de la naturaleza, y esto no volverá a ocurrir... En el futuro habrá una degeneración de las

¿Qué es lo más significativo que le ha sucedido a la física en los últimos 25 años? ¿Cuáles son las tendencias en la disciplina y los retos de futuro? ¿Cómo se ve este panorama desde nuestro país? El autor propone algunas respuestas sucintas a estas cuestiones

ideas, y nos sentiremos como los grandes exploradores cuando los turistas empezaron a invadir los nuevos territorios”.

Recientemente, John Horgan ha esgrimido argumentos similares en *El fin de la ciencia: los límites del conocimiento en el declive de la era científica* (1997), una obra polémica que no se detiene ante la física. Entre las voces que se han alzado contra Horgan se halla la del físico-químico y antiguo editor de *Nature*, John Maddox, quien argumenta en *Lo que queda por descubrir* (1998) que tenemos tan poca idea de lo que nos deparará la física de los próximos 50 años como la que tenían los físicos de finales del siglo XIX sobre las revoluciones relativista y cuántica [*véase también* “La ciencia del nuevo milenio”, por J. Maddox, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero 2000]. Entonces, la mecánica de Newton y la teoría electromagnética parecían incuestionables y, sin embargo, la física del siglo XX se erigió sobre nuevos cimientos. También la historia, pues, nos hace escépticos ante la idea de que la física vaya a agotarse.

En cualquier caso, el debate sobre los límites de la física no llegó a plantearse con fuerza en las décadas posteriores a la Segunda Guerra Mundial, años de crecimiento para la física gracias al papel desempeñado en la contienda y a su relevancia económica y militar durante la Guerra Fría. Sólo en los años setenta aparecieron signos de fatiga institucional y recesión.

En los Estados Unidos, los movimientos sociales y la crisis ener-



1. SECCION DEL ACELERADOR LEP, en el CERN, que actualmente se halla reconvirtiendo en el acelerador de partículas más potente del mundo, el Gran Colisionador de Hadrones (LHC), cuya entrada en funcionamiento está prevista para 2006. Una vez el proyecto haya superado las enormes dificultades técnicas y económicas que entraña, los físicos del primer gran laboratorio genuinamente europeo podrán reemprender la búsqueda del bosón de Higgs y confirmar el modelo estándar. En la imagen puede verse uno de los imanes dipolares del futuro acelerador.

gética dieron paso al primer accidente grave en una central nuclear (Three Mile Island, 1979) y al enjuiciamiento público del complejo académico-industrial-militar que había llevado al país al liderazgo mundial de la disciplina. Las críticas dañaron la imagen pública de la física y mermaron los recursos económicos destinados a ella, que entre 1967 y 1976 se redujeron un 34 %. Las repercusiones sobre las expectativas profesionales de los físicos no se hicieron esperar: si en 1970 se habían doctorado más de 1600 físicos, en 1980 apenas llegaron a 900.

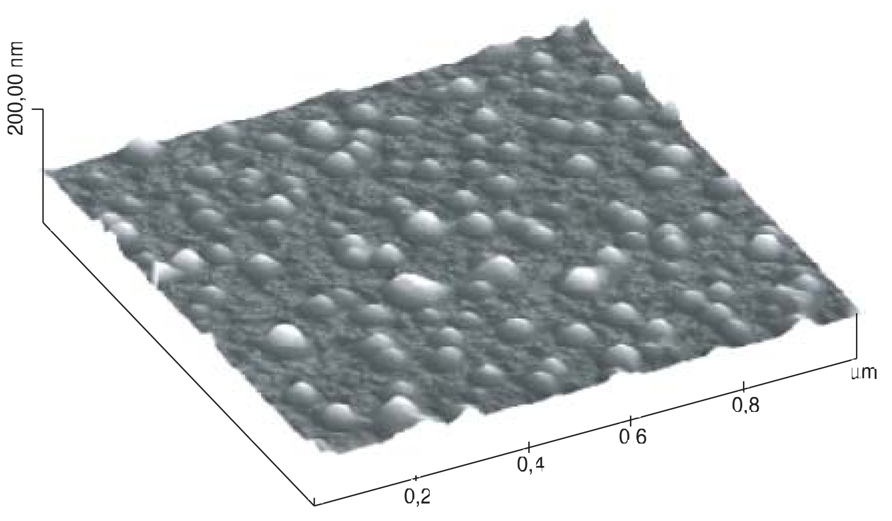
La crisis alcanzó también, aunque en menor medida, a los principales países europeos, y pasó casi inadvertida en España. Se trataba, con todo, de una crisis relativa, porque la física partía de una situación extremadamente saneada dentro del conjunto de las ciencias. El tiempo ha borrado el recuerdo de la recesión y hace, en cambio, que destaquen con nitidez los logros alcanzados desde entonces.

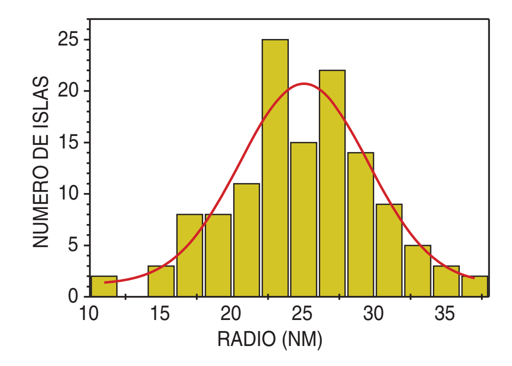
Cualquier balance, por somero que sea, debe partir de la física de altas energías (física de partículas, gravitación y cosmología), y es que ya sea por su relación filial con la radiactividad, la física nuclear y el proyecto Manhattan, por la fascinación que ejerce sobre nosotros la exploración del cosmos, o por la proyección personal de científicos como Albert Einstein, Niels Bohr, Feynman o Stephen Hawking, la física de altas energías configuró en gran medida la imagen de la física durante la segunda mitad del siglo XX.

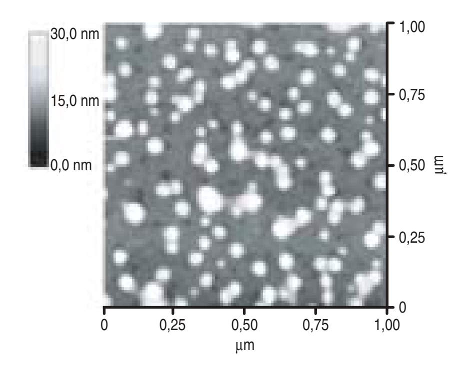
En ese período, el descubrimiento de cientos de nuevas partículas elementales, la búsqueda de un esquema clasificatorio y el análisis de las correspondientes interacciones mediante la teoría cuántica de campos culminó en la formulación del llamado modelo estándar de las partículas elementales. Las aportaciones teóricas más significativas han respondido al sueño de unificar las fuerzas de la naturaleza, que la física del siglo XX ha cifrado en cuatro: la gravitatoria, la electromagnética, la fuerte y la débil.

En 1967, Steven Weinberg y Abdul Salam lograron reducir las fuerzas electromagnética y débil a manifestaciones distintas de una misma interacción. Casi al mismo tiempo se introducía el modelo de quarks de las interacciones fuertes, que si bien no despertó inicialmente demasiado interés, cobró fuerza al iniciarse el período que nos ocupa gracias a la formulación de la cromodinámica cuántica. Ambas teorías describían las interacciones mediante grupos de simetría —$SU(2) \times U(1)$ en el caso de la teoría electrodébil, $SU(3)$ en el caso de la cromodinámica cuántica—, y en 1974 Howard Georgi y Sheldon Glashow propusieron una teoría unificada, basada en el grupo de simetría $SU(5)$. Lo que parecía una quimera teórica no ha dejado de plantear retos experimentales muy considerables, como el que supone confirmar la estimación teórica de la vida media del protón (10^{-31} años).

Naturalmente, la Gran Teoría Final debiera incluir la gravitación, pero la formulación de una teoría cuántica del campo gravitatorio no está a la vista y supone uno de los problemas más acuciantes de la física actual. La teoría de la gravitación vigente es la teoría de la relatividad general, que desde su formulación por Einstein en 1915 ha superado a cuantos rivales se le han presentado. Si en el período de entreguerras la relatividad general apenas atrajo el interés de los físicos, a partir de los años sesenta la utilización de nuevos ins-







2. IMAGEN de islas nanocristalinas de carburo de silicio sobre substrato de SiO_2/Si, obtenida por un microscopio de fuerza atómica (AFM). Esta imagen topográfica de una superficie a escala atómica resulta del desarrollo de refinados sistemas de representación que no sólo hallan aplicación en la ciencia y técnica de materiales, sino también en la medicina, donde ofrecen nuevas vistas del cuerpo humano (es el caso de la resonancia magnética nuclear). En la gráfica se aprecia bien el tamaño y la distribución de tamaños de las islas de la figura AFM; la imagen inferior derecha corresponde a la misma muestra vista de frente.

trumentos de observación astronómica no ópticos, como el radar, reveló la existencia de extraños cuerpos celestes predichos por la teoría, como los cuásares (del inglés *quasi stellar*) o los púlsares (estrellas de neutrones en rápida rotación que emiten pulsos electromagnéticos periódicos); sin duda el objeto más popular de este género son los agujeros negros, nombre con el que se conoce a una concentración de masa tan densa, que ningún tipo de materia o radiación puede escapar de ella. Los astrofísicos, con todo, siguen construyendo telescopios ópticos cada vez más potentes —entre los que se halla el Gran Telescopio de Canarias, que pronto entrará en funcionamiento— y en la última década han lanzado telescopios espaciales como el Hubble (1990).

La demarcación entre cosmología y física de partículas se difumina a medida que retrocedemos en el tiempo para intentar comprender el origen del universo. Por otro lado, de la fusión entre una de las especialidades más venerables de la física y una de las teorías más revolucionarias del siglo XX ha surgido una nueva subdisciplina, la astrofísica relativista, que ha conocido un auge importante en los últimos decenios.

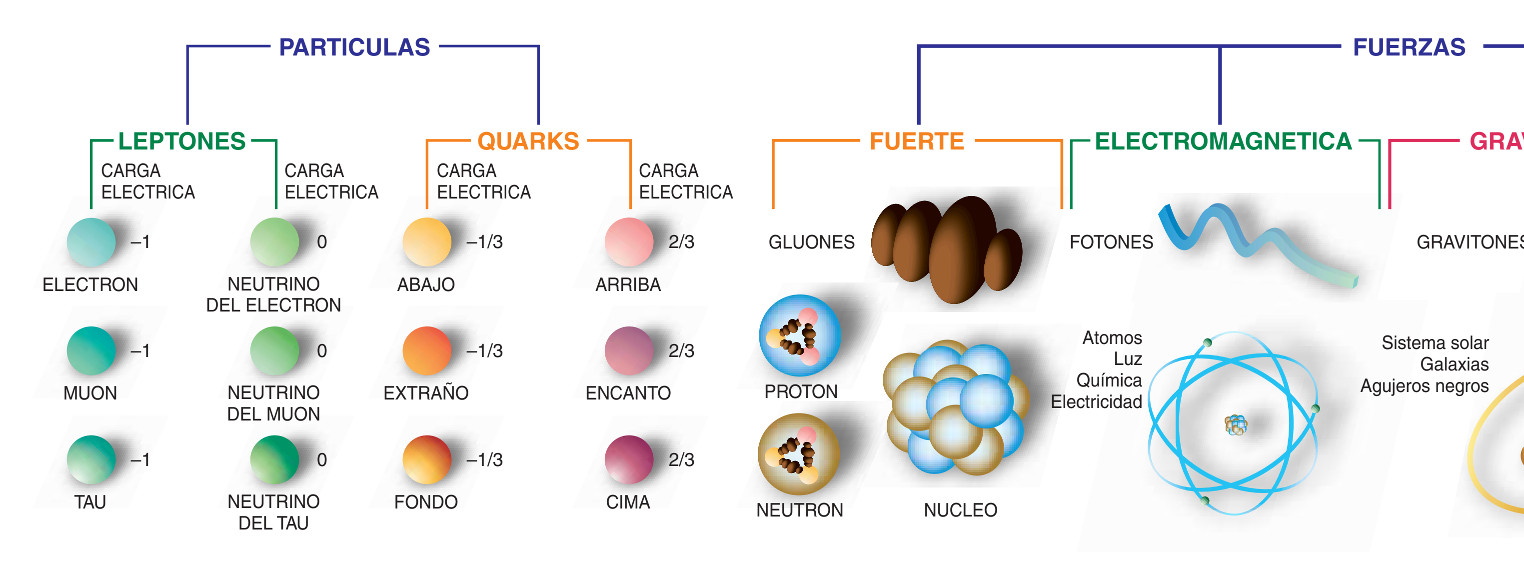
Nuestro conocimiento de las interacciones fundamentales está directamente relacionado con el tamaño de los grandes aceleradores de partículas. El prestigio alcanzado por la física de altas energías, tras la Segunda Guerra Mundial, garantizó la construcción de estas instalaciones costosísimas, imprescindibles para desentrañar la naturaleza última de la materia. En la última década del siglo, sin embargo, la física de altas energías sufrió un revés de gran valor simbólico: en 1993, el Congreso estadounidense decidió cancelar el proyecto del *Supercolisionador Superconductor* (SSC), un túnel de 83 km de circunferencia que habría acelerado protones a energías cercanas a los 40 teravolt (40×10^{12} electronvolt).

La muerte del SSC, sin embargo, no supuso el fin de la física experimental de altas energías, porque Europa aprobaba un año después la construcción del Gran Colisionador de Hadrones (LHC), llamado a ser, cuando entre en funcionamiento en 2006, el mayor acelerador del mundo. Para los 45 países que participan en su desarrollo (incluidos los Estados Unidos), el LHC será lo más parecido al "acelerador mundial para la paz mundial" con el que soñaron físicos norteamericanos, soviéticos y europeos en los años sesenta y setenta.



3. PHILIP WARREN ANDERSON (*izquierda*) y Paul L. Richards, de los laboratorios Bell, inspeccionando el dispositivo experimental con el que confirmaron la naturaleza mecánico-cuántica de los fenómenos de la superfluidez y la superconductividad y la relación entre ambos (1965). Anderson, que en 1977 recibió el premio Nobel de física junto a John van Vleck y Nevill Mott, representa bien al físico industrial vinculado a la física del estado sólido, que en las últimas décadas del siglo XX se erigió como una de las áreas de la física de mayor proyección.

El proyecto LHC está liderado por el CERN, el gran laboratorio europeo de investigación nuclear creado en 1952, en una de las primeras decisiones de carácter científico y político para la creación de una Europa unificada. El CERN se ha consolidado desde entonces como un centro de referencia para la especialidad, y cuenta en su haber con diversos hallazgos de gran importancia, como la detección en 1983 de las partículas W^{+-} y Z, mediadoras de la interacción electrodébil. (Es el tipo de descubrimiento que lleva directamente al Nobel, en este caso para Carlo Rubbia y Simon van der Meer en 1984, aunque el premio, de carácter personal, se adapta mal al trabajo en equipo característico de la física contemporánea.)



4. ESQUEMA del modelo estándar de las partículas elementales, que describe los componentes últimos de la materia y las interacciones entre ellos. Según el modelo, la materia está constituida por quarks y leptones (partículas de espín semi-entero, o fermiones). Entre los leptones se hallan el electrón y dos partículas más de carga negativa, cada una de las cuales tiene asociado un neutrino. El modelo estándar describe las interacciones fundamentales entre quarks y leptones a través de la mediación de una partícula de espín entero, o bosón, que determina

Contra lo que pudiera pensarse, los biólogos moleculares —a principios de los noventa se debatía también la necesidad de financiar el proyecto Genoma Humano— no fueron los únicos beneficiarios de la cancelación del SSC. Entre los oponentes al superacelerador se hallaban varios premios Nobel de física, como Philip Anderson, quien además de considerar que el gasto no estaba justificado, creía que la física de la materia condensada era tan o más ventajosa científica y económicamente que la de altas energías. Además, Anderson cuestionaba abiertamente el reduccionismo de los partidarios más acérrimos del SSC, que hacían del conocimiento de las leyes fundamentales el único fin legítimo de la física, así como la jerarquía disciplinar que situaba la física de altas energías en el vértice, desde el cual podían deducirse cómodamente el resto de leyes y fenómenos.

No le faltaba razón a Anderson, representante de un tipo de física no académica vinculada a la industria de las telecomunicaciones. La física del estado sólido, nacida en los años treinta como un área subsidiaria de la mecánica cuántica, había ido cobrando importancia e independencia gracias en buena parte a su inmenso potencial técnico. No en vano los descubridores del transistor trabajaban para AT&T y Bell, que tenía sólidas razones para investigar la posibilidad de rectificar una corriente mediante un dispositivo más fiable y energéticamente eficaz que las válvulas de vacío usadas hasta entonces. La relevancia de esta especialidad no ha hecho sino aumentar con el tiempo, y de ella dependen buena parte de las técnicas con las que estamos más familiarizados, que incorporan materiales semiconductores y láseres.

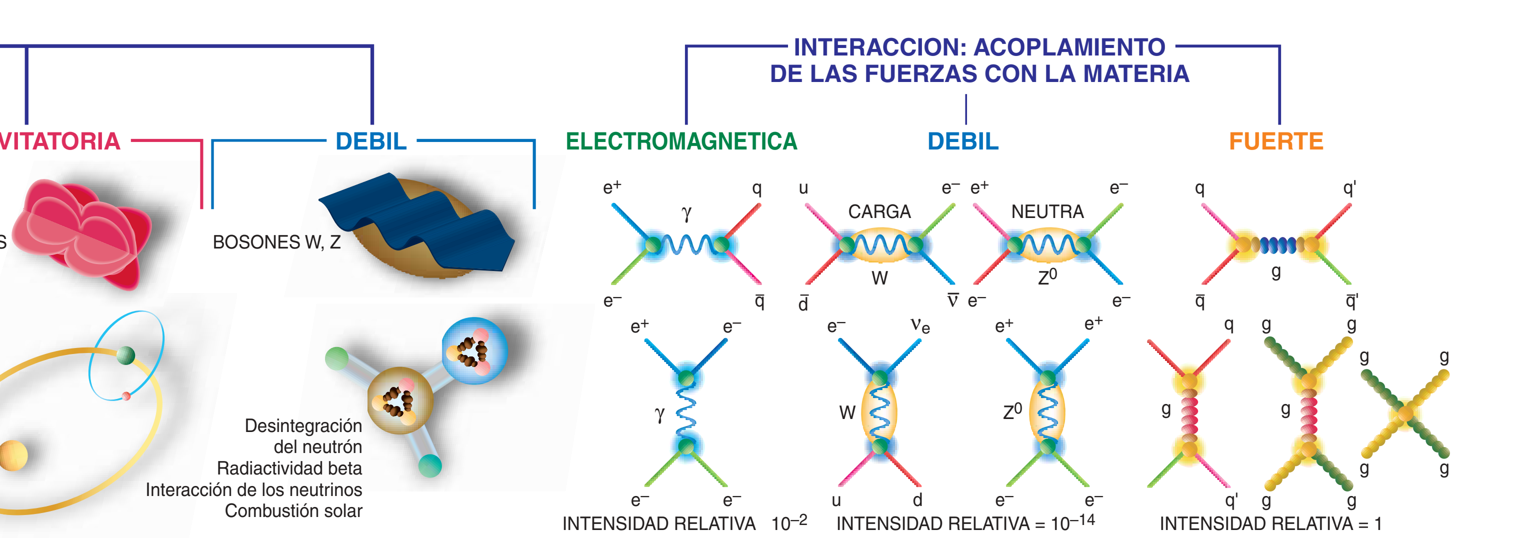
El potencial tecnológico de la física está lejos de agotarse. En los últimos años, la idea de un computador cuántico ha tomado cuerpo, y sólo estamos empezando a explorar las posibilidades de la nanotécnica.

Nuestra revisión, polarizada en torno a dos áreas de indudable importancia, no debiera dejar de lado especialidades aparentemente menores que tienen, sin embargo, un peso específico considerable, como la termodinámica y la mecánica estadística, o la física atómica y molecular. Tampoco hay que olvidar, por último, que la física ha tendido o consolidado en los últimos años numerosos puentes con otras disciplinas, dando lugar en algún caso a nuevas especialidades de importancia creciente, como la biofísica o la física ambiental, o renovando subdisciplinas de larga tradición, como la geofísica.

La física en España

Estos desarrollos han sido seguidos de cerca por los físicos españoles, que en los últimos 30 años han vivido sin duda el período más fructífero para la disciplina desde su constitución como tal, diferenciada de la filosofía natural, a lo largo del siglo XIX. Los esfuerzos de la generación de físicos que, en las primeras décadas del XX, intentó modernizar la física española (Esteban Terradas, Miguel Catalán, Julio Palacios y Blas Cabrera) se vieron truncados por la Guerra Civil, y hay que buscar las raíces de la física contemporánea en España en el franquismo. Se trata de un tema poco estudiado por su inmediatez.

En el caso de la física teórica de altas energías, uno de los más significativos, se invirtió en España el proceso seguido en los países que habían fundado la especialidad, lo que quiere decir que la investigación fundamental llegó de la mano de los usos civiles o militares de la energía nuclear. La Junta de Energía Nuclear, creada en 1951, promovió la formación de los primeros físicos de altas energías e instó el ingreso de España en el



la intensidad relativa de la fuerza. La interacción fuerte da cuenta de la estabilidad de protones, neutrones y está mediada por el gluon. La interacción electromagnética permite entender las fuerzas atómicas y moleculares que rigen las reacciones químicas y el comportamiento de la luz, y está mediada por el fotón. La interacción débil, mediada por los bosones W y Z, explica la desintegración del neutrón y el origen de la radiación β. No disponemos de un modelo teórico-cuántico de la interacción gravitatoria, que estaría hipotéticamente mediada por el gravi-

CERN en 1961. El abandono del gran laboratorio europeo en 1968 fue desastroso para los físicos experimentales de altas energías, pero no así para los teóricos, que consiguieron del Gobierno la cesión de parte de la cuota anual al CERN y administraron cantidades nada desdeñables a través del GIFT (Grupo Interuniversitario de Física Teórica), un organismo que no llegó a tener existencia legal pero que contribuyó a la modernización de la especialidad mediante el intercambio de profesores y doctorados con el extranjero y la organización de cursos avanzados. Ello explica que en un muestreo realizado en 1981 España ocupara la "segunda división" entre los países con más publicaciones en física de altas energías, junto con India, China, Canadá, Polonia e Israel. En 1983 España volvió a ingresar en el CERN.

En cualquier caso, el salto cualitativo se produjo durante la transición democrática. La física, como otras ciencias, se benefició del aumento significativo en la inversión en ciencia y técnica que tuvo lugar en España entre 1977 y 1992, y se diría que no ha sufrido tanto el estancamiento efectivo de la inversión en los años noventa gracias a los diversos planes nacionales de investigación centrados en la física y a la explotación de los programas marco de la Unión Europea. Los estudios realizados sobre las publicaciones de los físicos españoles en revistas extranjeras muestran que el número de citaciones recibidas es comparable a la de los físicos de otros países. Se registra también el predominio de las aportaciones realizadas desde la universidad, que para el período 1986-1988 representaban el 83 % de los artículos sobre física de autores españoles recogidos por la conocida base de datos INSPEC.

La prosperidad relativa de la física y la mejora de nuestra situación internacional no pueden ocultar que seguimos moviéndonos en porcentajes del PIB dedicados a la investigación que no llegan a la mitad de los que dedican las naciones europeas de referencia; tampoco pueden ocultar el hecho preocupante de que los últimos incrementos en el presupuesto de I+D del Estado hayan sido en gran parte absorbidos por programas de defensa de dudoso, cuando no nulo, valor científico. Según un informe elaborado en 1999 por la Cátedra Unesco para la Paz y el Desarrollo de la Universidad Autónoma de Barcelona, el presupuesto general del Estado para el año 2000 preveía un destino militar para el 41 % de los 500.000 millones de pesetas dedicados a investigación y desarrollo, con los que sufragar, entre otras cosas, el desarrollo del avión de combate EF-2000 o la fabricación de los carros de combate Leopard. El presupuesto general del Estado para 2002, recientemente presentado, abunda en esta dirección.

Al margen de la justa administración de unos recursos públicos que, según los investigadores, debieran doblarse con urgencia, la física en España adolece de la falta de conexiones con la industria. La imbricación entre universidad y empresa no debiera limitarse a tareas directamente productivas, sino que debiera incluir el desarrollo de investigaciones originales en un entorno que puede ser tan propicio como el académico, como lo demuestran los laboratorios de empresas como IBM, AT&T o Philips. Aunque para ello se precisa una amplitud de miras que no parece abundar ni entre nuestros empresarios ni entre nuestros dirigentes, demasiado preocupados por el rendimiento a corto plazo.

Física, cultura y sociedad

Pese a la competencia creciente de las ciencias de la vida, la física ha seguido ocupando durante el período que estamos considerando



5. PROPAGACION guiada de luz láser a través de fibras ópticas de materiales plásticos, con el fin de aplicarla en las comunicaciones ópticas. El láser, uno de los fenómenos cuánticos más ubicuos en nuestra sociedad, se halla también en la base del desarrollo de nuevos sistemas de transmisión de la información.

un lugar destacado en las obras de divulgación científica y los medios de comunicación. Cabe recordar series televisas de éxito como *Cosmos*, de Carl Sagan, o más recientemente *El universo de Stephen Hawking*. Los físicos han protagonizado también obras de teatro como la *Vida de Galileo* de B. Brecht (reescrita en 1945, bajo la impresión causada por el lanzamiento de las bombas atómicas sobre Japón, y que plantea una lectura inequívocamente contemporánea de la condena a Galileo y la servidumbre de la ciencia), *Los físicos*, de Friedrich Dürrenmat o recientemente *Copenhague*, de Michael Frayn, que trata sobre los dilemas morales de W. Heisenberg y N. Bohr durante la Segunda Guerra Mundial con gran veracidad histórica.

Los físicos han desempeñado también un papel destacado en las llamadas *guerras de ciencia* que han agitado en los últimos tiempos el panorama científico-cultural norteamericano y, en menor medida, el europeo. Un físico, Alan Sokal, protagonizó en 1996 uno de los episodios más conocidos. Con la intención de desenmascarar a filósofos y sociólogos que utilizan conceptos científicos para revestir de autoridad y prestigio a sus escritos, Sokal envió a la revista *Social Text* un artículo delirante, una parodia llena de términos científicos descontextualizados y carentes de sentido. Los editores de la revista aceptaron y publicaron el artículo de Sokal, quien poco después descubría públicamente la farsa y explicaba en *Imposturas intelectuales* (1997, con Jean Bricmont) qué había de malo, según él, en la obra de filósofos como Jacques Lacan, Jean Baudrillard, Gilles Deleuze o Félix Guattari, entre otros.

Para muchos, Sokal había acertado al denunciar el uso indiscriminado de conceptos científicos y la falta de rigor de algunos intelectuales posmodernos. Aun así, no hay que olvidar que los abusos han sido propiciados en más de una ocasión por los propios físicos, lo que es especialmente cierto de los creadores de la mecánica cuántica. En un libro oportuno aparecido en 1999, Mara Beller recuerda los intentos de M. Born por extrapolar la noción de complementariedad al ámbito de la política, las conexiones entre cuántica y psicología enunciadas por Bohr, o la dualidad ciencia-religión postulada por Wolfgang Pauli, inspirándose en la dualidad onda-partícula.

Al margen de las responsabilidades que quepa discernir en este caso, lo cierto es que los físicos nunca han dejado de aprovechar las ocasiones para mostrar la significación cultural y social de sus ideas, más allá de su inmediata aplicabilidad técnica. De este tráfico han surgido algunas de las páginas más valiosas de la historia de la disciplina; en última instancia, hay pocas dudas de que resulta beneficioso tanto para la propia física como para la sociedad.

Bibliografía complementaria

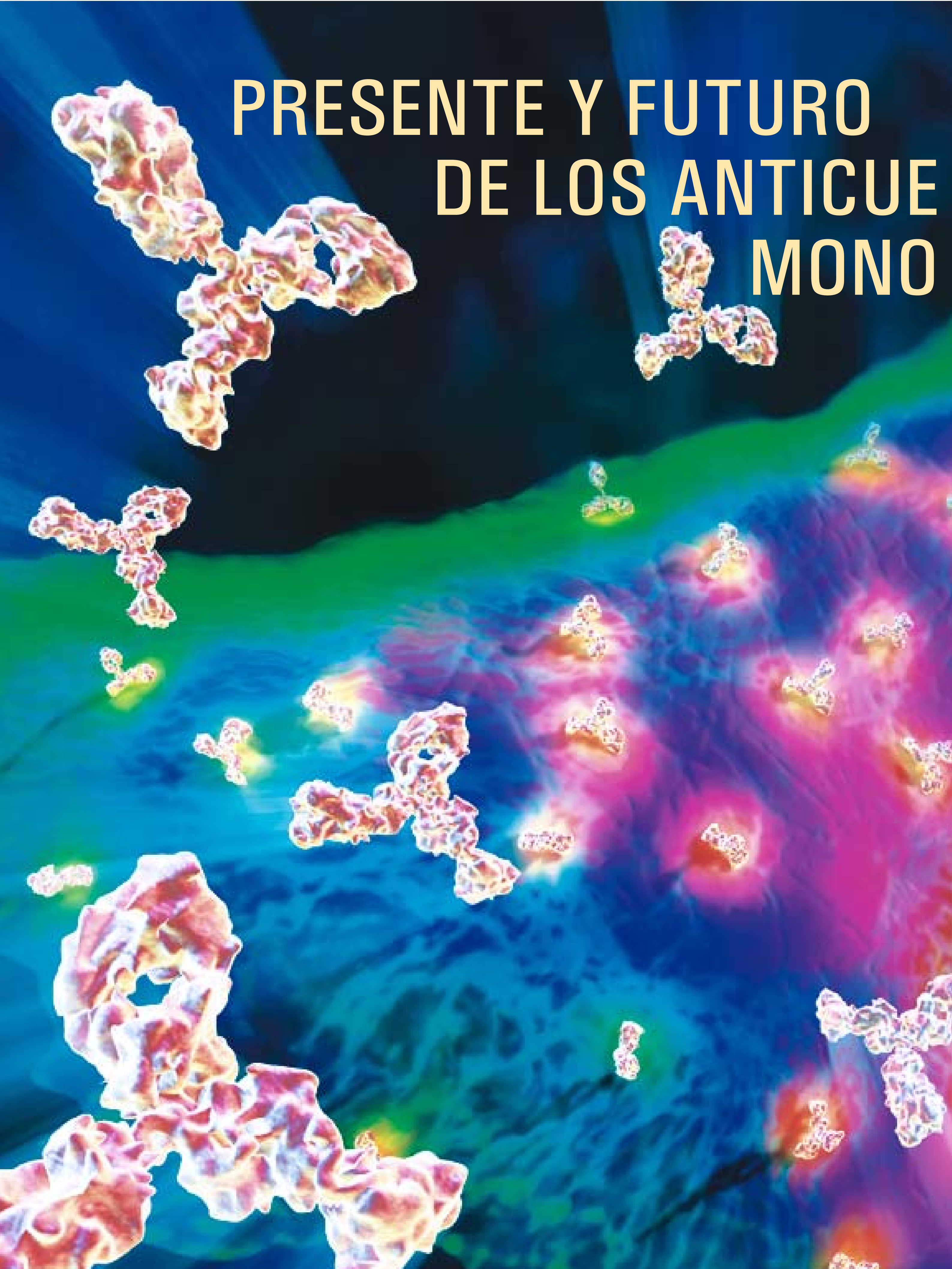
TWENTIETH CENTURY PHYSICS. 3 vols. Dirigido por Laurie Brown, Abraham Pais y Brian Pippard. American Institute of Physics; Nueva York, 1995.

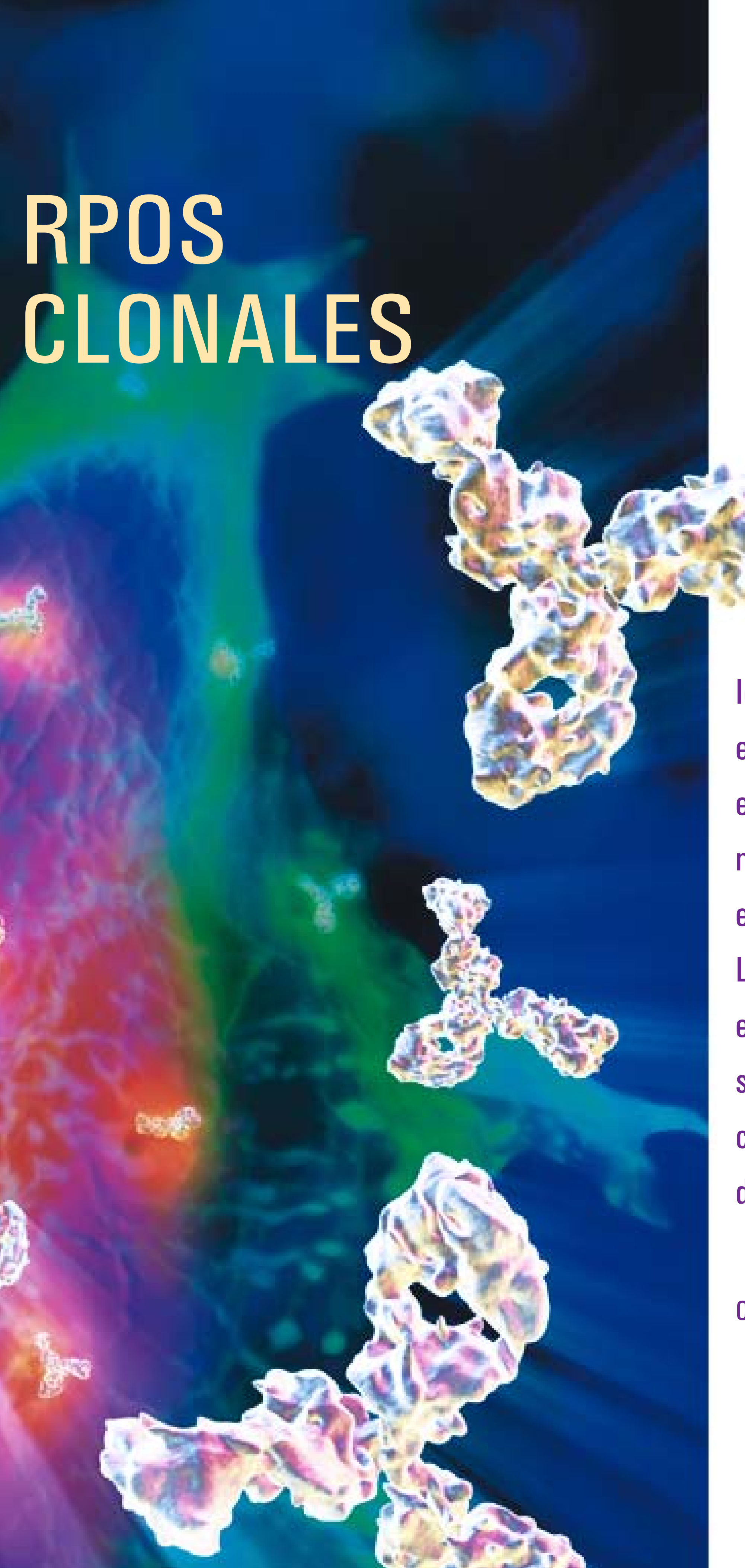
ESTADO, CIENCIA Y TECNOLOGÍA EN ESPAÑA: 1939-1997. Luis Sanz Menéndez. Alianza; Madrid, 1997.

IMPOSTURES SCIENTIFIQUES. LES MALENTENDUS DE L'AFFAIRE SOKAL. Dirigido por Baudouin Jurdant. La Découverte/Alliage; París, 1998.

QUANTUM DIALOGUES. THE MAKING OF A REVOLUTION. Mara Beller. The University of Chicago Press; Chicago, 1999.

QUANTUM GENERATIONS. A HISTORY OF PHYSICS IN THE TWENTIETH CENTURY. Helge Kragh. Princeton University Press; Princeton, 1999.


PRESENTE Y FUTURO
DE LOS ANTICUE
MONO



RPOS CLONALES

Ideados para curar
el cáncer y otras
enfermedades,
no lograron alcanzar
el fin previsto.
Las dificultades
encontradas podrían
subsanarse ahora
con prototipos
de nuevo cuño

Carol Ezzell

El optimismo ilimitado que despertaron los anticuerpos monoclonales en los años ochenta resultó contagioso. A propósito del cáncer, creíase que, a la manera de misiles teledirigidos, los anticuerpos monoclonales portadores de tóxicos o isótopos radiactivos podrían orientarse contra las células tumorales y depositar su carga letal, eliminando las células cancerosas y dejando intactas las normales. Si de enfermedades infecciosas se trataba, los anticuerpos monoclonales sitiarían a los virus y bacterias introducidos en el organismo, confinándolos en recintos donde las células del sistema inmunitario acabarían con ellos.

Pero la realidad ha mostrado que las cosas son más difíciles. Los anticuerpos monoclonales son proteínas del sistema inmunitario muy puras que atacan dianas moleculares específicas. Para su infortunio, los individuos que recibieron la primera hornada de anticuerpos monoclonales con fines terapéuticos tendían a desarrollar sus propios anticuerpos contra los anticuerpos inyectados. Eso hizo que, por causas que no acabamos de conocer, progresaran aún más en su patología. El hígado secuestraba tales anticuerpos monoclonales y los eliminaba antes de que pudieran alcanzar sus objetivos. Fracasaron los ensayos clínicos. Las inversiones se hundieron, con pérdidas millonarias. Cundió el escepticismo entre científicos y laboratorios farmacéuticos.

Pero no todos abandonaron. Gracias a su esfuerzo se descubrieron vías para corregir las deficiencias de los primeros fármacos. Al mercado ha llegado ya una decena de anticuerpos monoclonales. Tres más esperan una pronta aprobación por la norteamericana Oficina de Alimentación y Farmacia (FDA). Dos estarán equipados para llevar una dosis de radiactividad. Hay un centenar largo en fase de ensayo en humanos, superadas con éxito las pruebas en animales. La cifra, en opinión del analista Franklin M. Berger, no dejará de crecer.

La FDA ha puesto sordina a la nueva euforia, sin embargo. En julio el ente administrativo comunicaba a la empresa Genentech que deberá presentar una documentación más exhaustiva de los estudios clínicos con humanos que demuestren la seguridad a largo plazo de sus anticuerpos monoclonales contra el asma (Xolair). Estos eliminan los anticuerpos que desempeñan una función clave en el asma y las alergias. Algunos observadores ven en ese requerimiento una muestra del rigor que la FDA piensa aplicar en el examen de los efectos secundarios de los anticuerpos monoclonales, en particular cuando se trate de los indicados para enfermos crónicos.

Las ventajas de los anticuerpos monoclonales son evidentes. Donald L. Drakeman, presidente de Medarex, reconoce que resulta más fácil la producción de anticuerpos que la de medicamentos tradicionales, elaborados a partir de pequeñas moléculas inorgánicas. Por ser macromoléculas los anticuerpos, quizá no puedan indicarse en todas las enfermedades. Ahora bien, el desarrollo de un anticuerpo monoclonal hasta la fase de ensayo clínico sólo requiere uno o dos años, en comparación con los cinco que se necesitan en el caso de una molécula pequeña. La rapidez significa ahorro. Drakeman estima en un par de millones de dólares la obtención de un anticuerpo monoclonal a punto para las pruebas clínicas, mientras que se necesitan 20 millones de dólares para un medicamento tradicional. A pesar de las reticencias de la FDA ante el fármaco de Genentech, los anticuerpos monoclonales son más eficaces para eliminar moléculas mediadoras implicadas en las enfermedades que cualquier otro medicamento basado en pequeñas moléculas. Los anticuerpos casi nunca son tóxicos.

Por ironía de las cosas, los anticuerpos monoclonales podrían ser víctimas de su propio éxito. Sostienen los analistas del mercado que las industrias carecen de instalaciones suficientes para fabricarlos todos. Para adelantarse a ese problema, los laboratorios han comenzado a dirigir sus investigaciones hacia la producción de anticuerpos en la leche de animales de granja (corderos, vacas, etc.) o en plantas.

Métodos para producir monoclonales

El fracaso de los anticuerpos monoclonales en el pasado se debió, en parte, al proceso de su elaboración inicial. La técnica de manufactura clásica fue ideada por Georges J. F. Köhler y César Milstein, inmunólogos del Laboratorio de Biología Molecular del Consejo de Investigaciones Médicas en Cambridge, por cuya innovación se les otorgó el premio Nobel de fisiología y medicina en 1984. A grandes rasgos, el procedimiento consistía en la inyección de un antígeno (sustancia que el sistema inmunitario reconoce como extraña o peligrosa) en un ratón. Se inducía así la proliferación, en el animal, de

Resumen/Anticuerpos monoclonales

- Los anticuerpos son macromoléculas en forma de Y, producidas por los linfocitos *B*, células del sistema inmunitario. Tienen por misión luchar contra los invasores. Los anticuerpos monoclonales están sintetizados por copias idénticas, o clones, de un mismo linfocito *B*, por cuya razón atacan una sola diana específica.
- Hay en el mercado una decena de anticuerpos monoclonales. Cubren desde la prevención del rechazo de un órgano trasplantado hasta la oncoterapia. Otros tres monoclonales esperan la aprobación de la Oficina de Alimentación y Farmacia (FDA).
- Aunque la producción de anticuerpos monoclonales suele corresponder a los hibridomas, unas células de mamífero, se está trabajando en su obtención a partir de la leche de animales sometidos a ingeniería genética y a partir de plantas transgénicas.
- Comparados con los medicamentos tradicionales, fabricados de pequeñas moléculas inorgánicas, los anticuerpos monoclonales resultan más baratos y más fáciles de preparar antes de entrar en la fase de ensayo clínico.

linfocitos *B* (células productoras de anticuerpos) que sintetizaban anticuerpos específicos contra el antígeno inyectado. Para obtener los anticuerpos específicos, los inmunólogos debían ceñirse a los linfocitos *B* que los fabricaban. Pero resulta ser una tarea harto difícil el determinar de qué linfocitos *B* se trata, para separarlos de los que no producen tales anticuerpos.

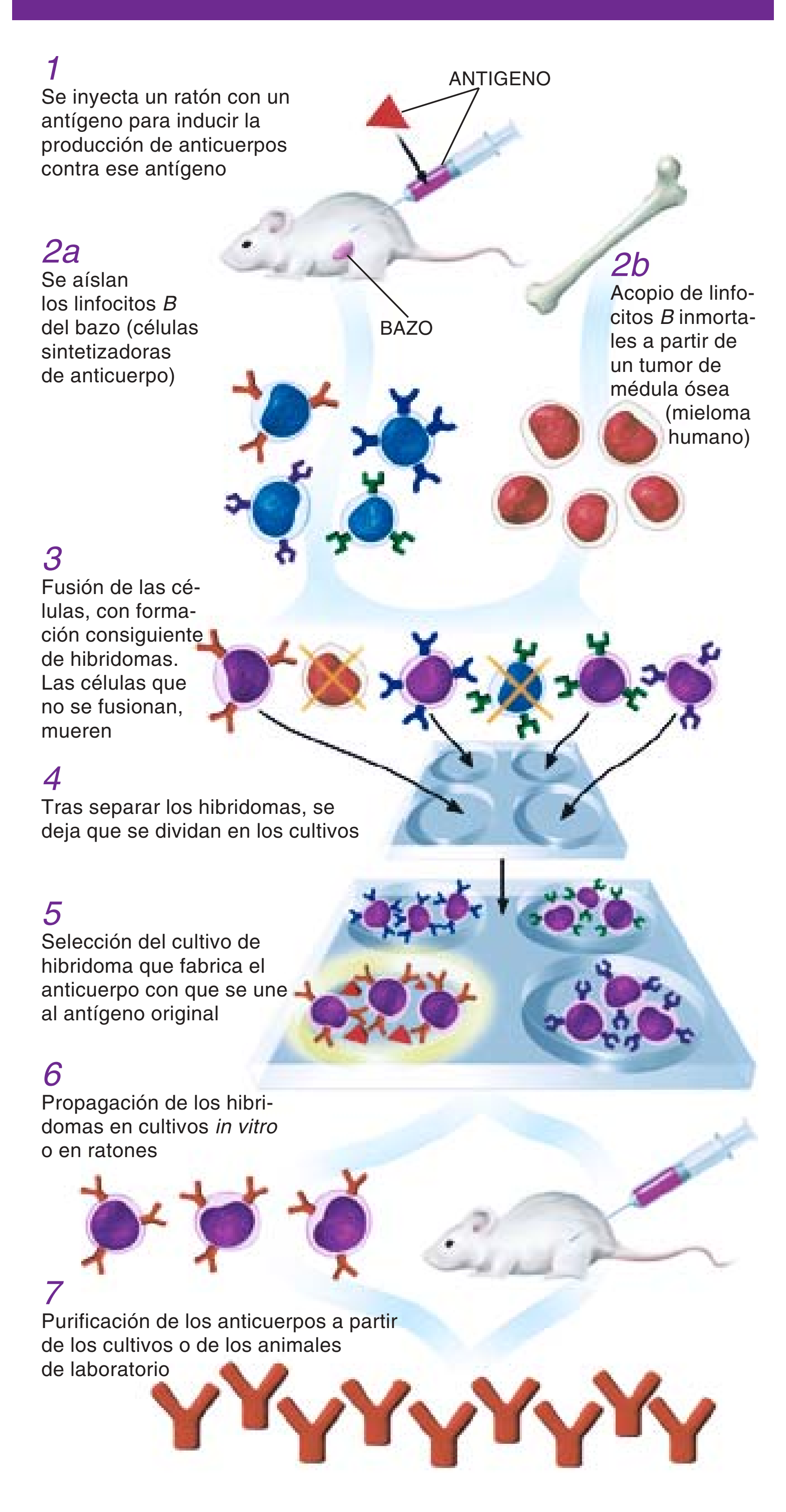
En ese procedimiento complejo, los linfocitos *B* del ratón han de fusionarse con células de cultivo inmortalizadas (que se replican ilimitadamente) para crear hibridomas. Estas nuevas células resultantes de la fusión producen anticuerpos murinos, que el sistema inmunitario humano puede percibir como intrusos. Por eso, los pacientes que han recibido inyecciones de anticuerpos monoclonales murinos han experimentado una respuesta AHAM, denominada así por los anticuerpos humanos antimurinos que se generan. Las respuestas AHAM provocan una hinchazón de las articulaciones, eritemas e insuficiencia renal, que pueden poner en peligro la vida. Tales respuestas destruyen también los anticuerpos murinos.

Con el fin de evitar la respuesta AHAM y la inactivación prematura de los anticuerpos de ratón por el sistema inmunitario, se han desarrollado distintas técnicas. Se busca con ellas hacer más humanos los anticuerpos. Estas macromoléculas, con forma de Y, se unen a los antígenos a través de los brazos, o regiones Fab, de dicha estructura. El vástago de la Y, la región Fc, interacciona con las células del sistema inmunitario. La región Fc reviste particular interés en la eliminación de las bacterias: en cuanto los anticuerpos recubren una bacteria mediante la unión con las regiones Fab, las regiones Fc atraen a las células encargadas de engullir los microorganismos para su aniquilación.

Para que los anticuerpos murinos se parezcan más a los humanos podemos reemplazar todo el anticuerpo monoclonal murino, salvo la parte de unión al antígeno, con los componentes de anticuerpos humanos. Cuatro de los anticuerpos comercializados en Estados Unidos

Producción de monoclonales a partir de hibridomas

La técnica tradicional opera con unas células fusionadas llamadas hibridomas



están hechos de esta forma, parte de ratón y parte humana. Recordaremos ReoPro, elaborado por la empresa Centocor, que previene la formación de coágulos mediante su unión a un receptor específico de las plaquetas.

Podemos seguir otro método, que consiste en la humanización de los anticuerpos. En esa técnica se fundan cinco fármacos que se expenden ya en farmacias. Uno de ellos es Herceptin, de Genentech, un anticuerpo monoclonal contra el cáncer de mama. La humanización se sirve de la ingeniería genética para sustituir, de forma selectiva y en todo lo posible, el anticuerpo murino con proteína humana, incluida la mayor parte de las regiones de unión al antígeno. Campath, fabricado por Millennium Pharmaceuticals, se receta a los pacientes con leucemia linfoide crónica cuando han fracasado otras medidas terapéuticas. Se une a un receptor que está presente en distintos tipos celulares normales y cancerosos del sistema inmunitario; tras el tratamiento, los pacientes producen un mayor número de células normales. Los otros anticuerpos monoclonales del mercado son anticuerpos totalmente murinos.

Tras más de 25 años de esfuerzo, se ha logrado por fin fusionar linfocitos *B* humanos con células inmortalizadas; los hibridomas resultantes generan anticuerpos plenamente humanos. En febrero, Abraham Karpas y su grupo anunciaron la proeza, aunque todavía es demasiado pronto para saber si los anticuerpos monoclonales producidos utilizando células humanas serán más seguros, más eficaces o más baratos de fabricar que los obtenidos a través de otras técnicas.

Medarex y Fremont han encontrado el método para inducir en el ratón la producción de anticuerpos plenamente humanos. Mediante ingeniería genética consiguen que el ratón aloje los genes de los anticuerpos humanos. Cuando se inyectan antígenos en los ratones, los animales fabrican anticuerpos plenamente humanos. Los laboratorios Abgenix han llevado a la fase de ensayo clínico un anticuerpo plenamente humano contra la interleucina-8 (IL-8); en cuanto citocina, esta sustancia química natural activa las células del sistema inmunitario. Cuando el organismo produce IL-8 en demasía, pueden aparecer enfermedades inflamatorias autoinmunes, como la artritis reumatoide o la psoriasis. En fase de ensayo clínico Medarex tiene anticuerpos monoclonales plenamente humanos de potencial aplicación en pacientes con cáncer y enfermedades autoinmunes. Trabaja, asimismo, en anticuerpos de diseño, preparados para liberar directamente una toxina en una célula enferma o para reclutar células inmunitarias que ataquen los tumores.

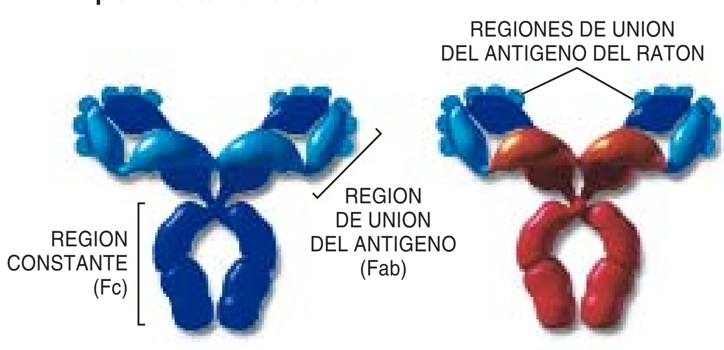
Otros laboratorios farmacéuticos se afanan en la obtención de anticuerpos monoclonales sin pasar por los ratones. La compañía inglesa Cambridge Antibody Technology y la alemana MorphoSys AG aplican la técnica de selección de fagos para lograrlo. Además de facilitar la producción en masa, el método ayuda a encontrar anticuerpos monoclonales específicos contra un antígeno determinado.

La selección de fagos está basada en un virus fibroso que infecta las bacterias. Tras aislar el ADN a partir de los linfocitos *B* humanos (cada célula produce un solo tipo de anticuerpo contra un antígeno determinado), se inserta dicho ácido nucleico en *Escherichia coli*, para infectar la bacteria. Puesto que estos fagos filamentosos producen nuevas copias de ellos mismos, fabricarán automáticamente las proteínas codificadas por los genes de los anticuerpos de varios linfocitos *B* que se expresarán en la superficie de los nuevos fagos sintetizados. Llegado ese momento, puede utilizarse el antígeno contra el que se desea obtener anticuerpos (pensemos en un receptor de una célula cancerosa), y así extraer los fagos portadores del gen que cifra el anticuerpo con mayor especificidad para ese antígeno. Para producir grandes cantidades del anticuerpo, se induce la infección de muchas bacterias o se inserta el gen del anticuerpo en las bacterias en cultivo.

Dar en la diana

Tomados en su conjunto, los nuevos tipos de anticuerpos monoclonales —quiméricos, humanizados y humanos— ofrecen óptimas perspectivas ante una serie de enfermedades. Dos de estos medicamentos, una vez aprobados por la FDA, convertirán en realidad los soñados anticuerpos monoclonales conjugados. Se da tal apelativo a los portadores de sustancias radiactivas o productos tóxicos hasta el propio tumor. Constituirán una nueva terapia del cáncer. Zevalin (desarrollado por IDEC Pharma-

TIPOS DE ANTICUERPOS obtenidos: de ratón, quiméricos, humanizados y plenamente humanos.



SITIOS ESPECIFICOS DE UNION
DEL ANTIGENO DEL RATON

ANTICUERPO HUMANIZADO
(90 por ciento humano)



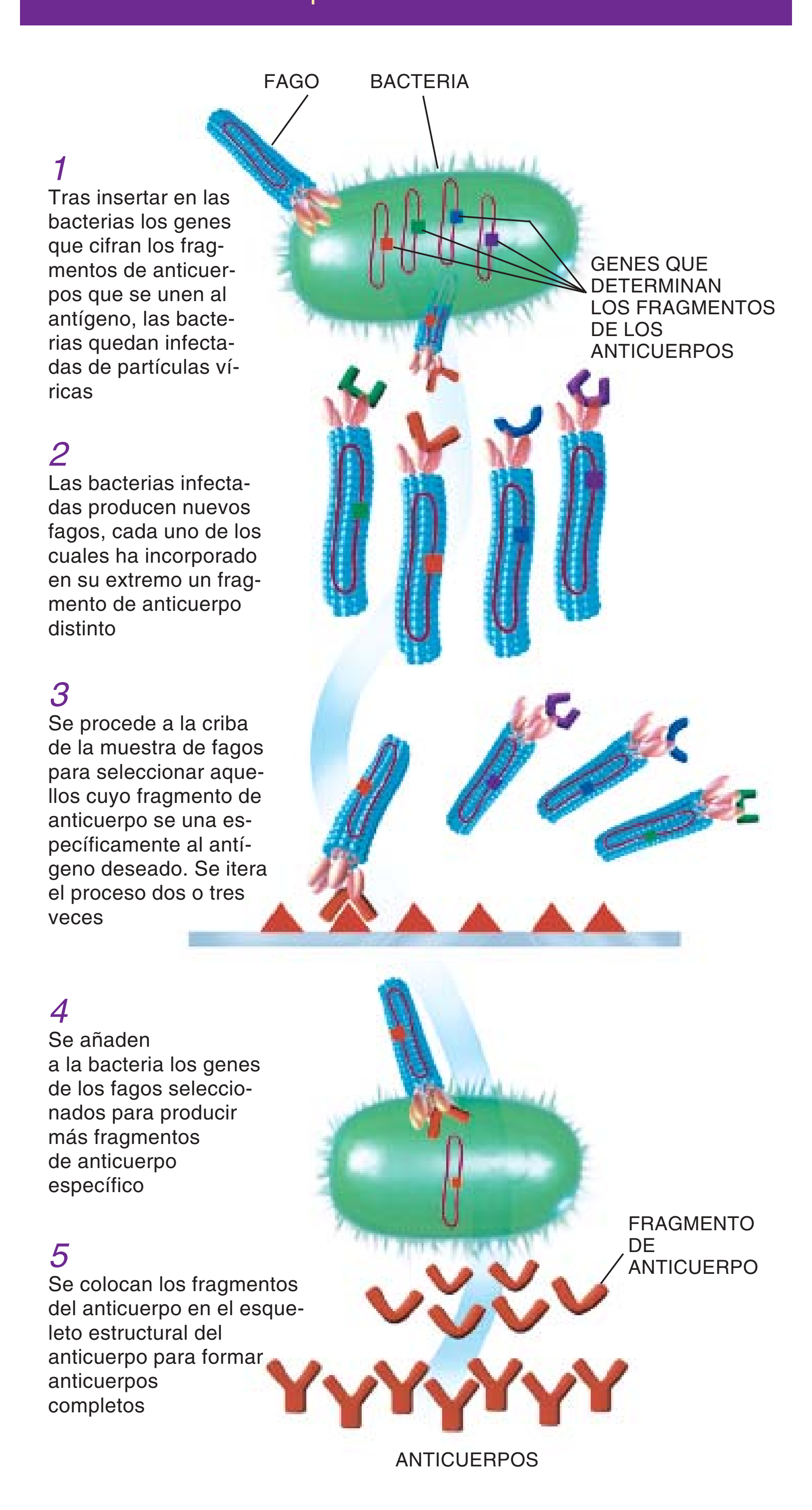
ceuticals y Schering AG) y Bexxar (fabricado por Corixa y GlaxoSmithKline) van dirigidos contra CD20, un antígeno que se encuentra en la superficie de los linfocitos *B*, células éstas que crecen de una forma descontrolada en el linfoma no Hodgkin. Zevalin transporta un isótopo de itrio (Y^{90}) y Bexxar uno de yodo (I^{131}).

En fase de ensayo clínico se hallan otros anticuerpos monoclonales contra moléculas de las células del sistema inmunitario que desempeñan una importante función en muchas enfermedades. Genentech tiene muy avanzada la prueba de Xanelim, un anticuerpo monoclonal contra CD11a. Esta proteína reside en la superficie de los linfocitos *T*, a los que ayuda a infiltrarse en la piel provocando la inflamación de la psoriasis, que afecta a unos siete millones de personas en los Estados Unidos. De acuerdo con un estudio reciente de unos 600 pacientes de psoriasis, el 57 por ciento de los enfermos a los que se había administrado la dosis más alta del medicamento experimentaron al menos un 50 por ciento de disminución de la gravedad de la enfermedad. Hay varios laboratorios farmacéuticos que preparan anticuerpos monoclonales contra el CD18, proteína de los linfocitos *T* que interviene en la inflamación y en la lesión hística subsecuente a cardiopatías.

El receptor del factor de crecimiento de la epidermis (EGF) constituye una diana muy sugestiva para los que investigan anticuerpos monoclonales. Un tercio de los pacientes con tumores sólidos produce receptores EGF en demasía; Gleevec, elaborado por Novartis y basado en una molécula pequeña, se interpone en la capacidad de las células tumorales para recibir las señales de proliferación emitidas por estos receptores. Quizá la forma más eficaz de erradicar el tumor sería administrar los anticuerpos monoclonales anti-receptor EGF en combinación con quimioterapia tradicional. Se ha demostrado que el cetuximab, un anticuerpo anti-receptor EGF producido por ImClone Systems, recupera la eficacia perdida por la quimioterapia en la cuarta parte

Producción de monoclonales a partir de fagos

En vez de hibridomas pueden emplearse fagos, virus que infectan las bacterias



ANTICUERPOS MONOCLONALES COMERCIALIZADOS

FARMACO	LABORATORIO	FECHA DE APROBACION	TIPO	DIANA	ENFERMEDAD
Orthoclone OKT3 (muro-monab-CD3)	Ortho Biotech/ Johnson & Johnson	1986	Murino	Antígeno CD3 en los linfocitos *T*	Rechazo agudo en los trasplantes de riñón, corazón e hígado
ReoPro (abciximab)	Centocor/ Eli Lilly & Co.	1994	Quimérico	Receptor de coagulación en las plaquetas (GP IIb/IIIa)	Coágulos sanguíneos en los pacientes sometidos a angioplastia u otra intervención cardíaca
Rituxan (rituximab)	IDEC Pharmaceut./ Genentech/Roche	1997	Quimérico	Receptor CD20 en los linfocitos *B*	Linfomas tipo no-Hodgkin (recaída o refractario de bajo grado)
Zenapax (daclizumab)	Protein Design Labs/ Roche	1997	Humanizado	Receptor de la interleucina-2 en los linfocitos *T* activados	Rechazo agudo del trasplante de riñón
Herzeptin (trastuzumab)	Genentech/ Roche	1998	Humanizado	Receptor del factor de crecimiento HER2	Cáncer de mama en estadio avanzado con receptores HER2
Remicade (inflixibmab)	Centocor/ Schering-Plough	1998	Quimérico	Factor de necrosis tumoral	Artritis reumatoide y enfermedad de Crohn
Simulect (basiliximab)	Novartis	1998	Quimérico	Receptor de la interleucina-2 en los linfocitos *T* activados	Rechazo agudo del trasplante de riñón
Synagis (palivizumab)	MedImmune	1998	Humanizado	Proteína F del virus respiratorio sincitial (VRS)	Infección por VRS en niños
Mylotarg (gemtuzumab)	Celltech/ Wyeth-Ayerst	2000	Humanizado	Antígeno CD33 en las células leucémicas	Recaída en la leucemia mieloide aguda
Campath (alentuzumab)	Millennium Pharmaceuticals/ Schering AG	2001	Humanizado	Antígeno CD52 en los linfocitos *B* y *T*	Leucemia linfoide crónica de linfocitos *B*

de los pacientes con cáncer colorectal avanzado.

Otros laboratorios centran su interés en anticuerpos monoclonales contra moléculas de la superficie de las células que tapizan los vasos sanguíneos. Algunas de estas moléculas, como las $\alpha_V\beta_3$, intervienen en la angiogénesis, o formación de nuevos vasos sanguíneos, que es, además, un proceso clave en el crecimiento tumoral.

Remicade, un medicamento basado en un anticuerpo monoclonal, ha demostrado su éxito en el combate contra el factor de necrosis tumoral (TNF). De esta molécula se vale el organismo para estimular el sistema inmunitario, aunque se halla también implicado en las enfermedades inflamatorias. Por la venta de ese fármaco, indicado para la enfermedad de Crohn (una patología inflamatoria de la pared intestinal) y la artritis reumatoide, la empresa Centocor ganó el año pasado 370 millones de dólares. Según Carol Werther, reputada financiera, los tratamientos que eliminen el TNF tienen un mercado anual de dos mil millones de dólares. Los laboratorios Immunex comercializan Embrel, que por su eficacia contra el TNF se indica para pacientes con artritis reumatoide moderada o grave. No se trata, en sentido estricto, de un anticuerpo monoclonal, pues sólo se utiliza la parte estructural del anticuerpo; esa región se une a otra molécula, el receptor celular normal del TNF.

Cuestiones emergentes

Ante ese rico muestrario de posibilidades, los laboratorios farmacéuticos podrían aumentar sus líneas de producción, anticipándose a un mercado prometedor. Pero en todo el mundo hay sólo 10 plantas industriales debidamente equipadas.

En la fabricación de anticuerpos monoclonales a partir de hibridomas se emplean unas cubas enormes llamadas biorreactores. Si oímos a V. Bryan Lawlis, de Diosynth ATP, un gigantesco biorreactor de 60.000 litros sólo podría producir cuatro preparados. Si se calcula que habrá 100 anticuerpos monoclonales en el mercado hacia el año 2010, las industrias necesitarán al menos 25 nuevas plantas para satisfacer la demanda. Si se considera que eso supone una inversión superior a los 5000 millones de dólares y requiere un tiempo de tres y cinco años para su construcción y aprobación por la FDA, la perspectiva de realización se volatiliza.

Así las cosas, algunas empresas vuelven la mirada hacia la explotación de animales y plantas transgénicos, manipulados para que porten los genes de determinados anticuerpos. Los mamíferos transgénicos que secretan anticuerpos monoclonales en su leche pueden generar un gramo de anticuerpo por unos 100 dólares, un tercio del coste de los métodos de producción tradicionales. Centocor y Johnson & Johnson se disponen a obtener Remicade de cabras transgénicas e Infigen busca extraer anticuerpos monoclonales de la leche de las vacas.

Aunque los animales transgénicos constituyen una opción atractiva, los laboratorios deberán seguir un procedimiento tedioso para aislar de otras proteínas de la leche los anticuerpos monoclonales. Si bien se ahorra el gasto de los 10.000 litros del biorreactor, quedan por solucionar los problemas de la purificación. Sin olvidar que la ingeniería genética y la mejora animal requieren años.

También se ve en las plantas la llave para paliar la escasez de anticuerpos monoclonales. Los vegetales ofrecen la ventaja de su economía, amén de poder aumentar fácilmente su producción ante la presión de la demanda: pueden rendir toneladas de monoclonales. Sin embargo, los problemas de purificación persisten y sigue siendo poco claro de qué modo la FDA legislará los fármacos producidos por las plantas transgénicas.

Los laboratorios Epicyte, partidarios de esa línea, se han asociado con Dow para producir plantas de maíz que rindan anticuerpos monoclonales de aplicación en cremas o ungüentos para mucosas superficiales de labios y genitales y en medicamentos de administración oral para las infecciones gastrointestinales o respiratorias. Un proyecto avanzado espera la aprobación oficial de los anticuerpos monoclonales sintetizados en el maíz para prevenir la transmisión, de adultos a neonatos, del virus del herpes. Se trabaja en anticuerpos monoclonales que, unidos a los espermatocitos, sirvan de anticonceptivo, así como en otros que protejan contra el papilovirus causante de las verrugas genitales y el cáncer cervical.

Bibliografía complementaria

A HUMAN MYELOMA CELL LINE FOR THE GENERATION OF HUMAN MONOCLONAL ANTIBODIES. A. Karpas, A. Dremucheva y B. H. Czepulkowski en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 98, n.º 4, páginas 1799-1804, 13 de febrero, 2001.

BIOTECH INDUSTRY FACES NEW BOTTLENECK. K. Garber en *Nature Biotechnology*, vol. 19, n.º 3, páginas184-185; marzo 2001.

Alerta roja en la Red

¿Podría desplomarse Internet? Los ataques de Código Rojo en julio y agosto constituyen un presagio amenazador de guerras cibernéticas entre grupos vandálicos o incluso entre gobiernos

Carolyn Meinel

"Imaginemos un resfriado de efectos letales que se difundiera rápidamente a lomos de las partículas de agua que el aire tiene en suspensión. Uno se cree perfectamente sano hasta que empieza a estornudar. Frente a él, no cabe más protección que un aislamiento absoluto, por otra parte, imposible de alcanzar."

Quien así se expresa no está describiendo el último brote gripal, sino una afección que aqueja a la Red. Tal dolencia informática hizo aparición a lo largo de los meses de julio y agosto pasados, y tiene a los investigadores en seguridad informática más preocupados que nunca sobre la integridad de Internet. Está su consternación provocada por Código Rojo, un gusano que prolifera en Internet. Se trata de un agresor electrónico que infecta a los servidores IIS de información de Microsoft en Internet (IIS es la sigla de Internet Information Servers). Los ordenadores domésticos se sirven normalmente de otros sistemas operativos, pero muchas de las más populares sedes de la Red operan con el sistema IIS.

En dos ofensivas relámpago, Código Rojo logró en muy pocas horas infiltrarse en centenares de miles de servidores IIS y ralentizar las operaciones a través de Internet. Cierto es que los efectos de Código Rojo han menguado, pero no lo es menos que el parcheo de las deficiencias de seguridad de los casi seis millones de servidores Microsoft IIS que se estima distribuidos por la Red en todo el mundo, y la reparación de los daños infligidos por el gusano, han costado millardos de euros.

Lo que verdaderamente quita el sueño a los administradores de sistemas y a otros técnicos, es que Código Rojo pueda ser precursor de plagas informáticas más virulentas. En el pasado, los daños solían consistir en incursiones perpetradas en sedes individuales. Se teme ahora el advenimiento de gusanos atacantes mejor diseñados, capaces de la degradación —y quién sabe si demolición— de la Malla Máxima Mundial.



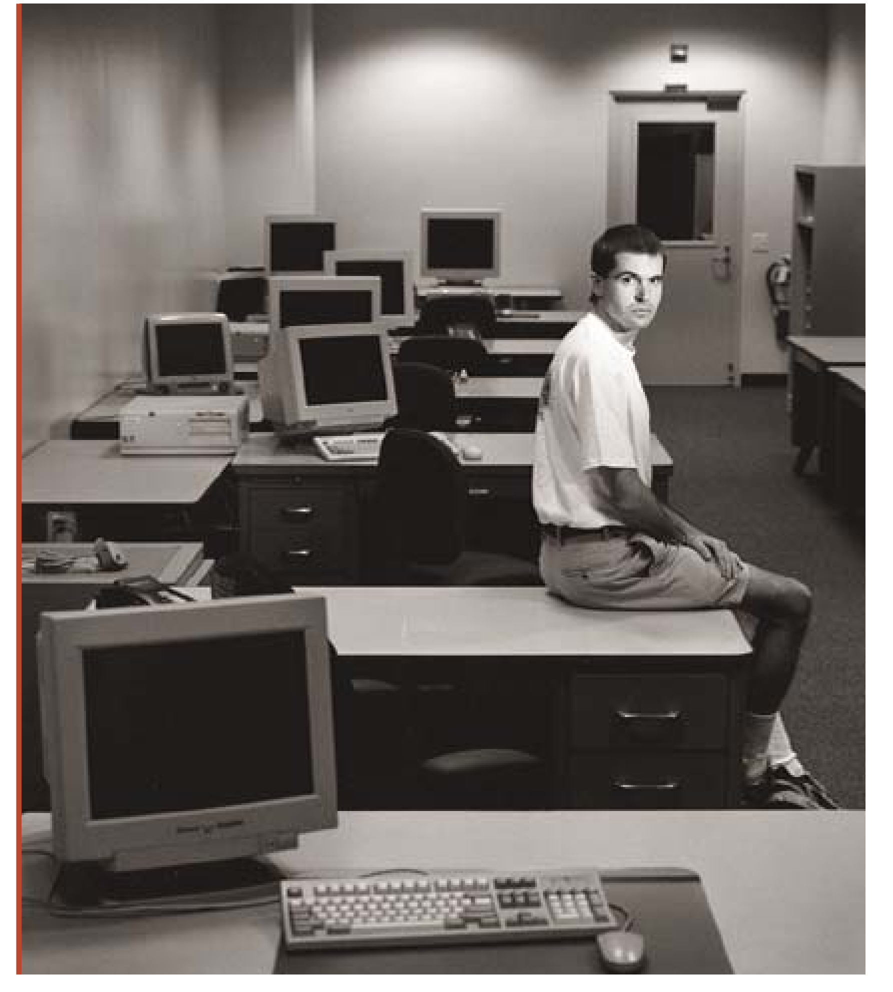


1. SE ESTAN RECLUTANDO guerreros del ciberespacio para que participen en las guerras cibernéticas que libra el gobierno de los EE.UU.

Más todavía: no faltan quienes sospechen que Código Rojo haya sido meramente un ensayo del tipo de programas de ordenador que el gobierno de un país cualquiera podría utilizar con miras a provocar el desplome de Internet en tiempos de guerra. Las escaramuzas que este verano tuvieron lugar en Internet tras el incidente entre el avión espía de los Estados Unidos y un caza chino ponen de relieve los peligros. Las hostilidades cibernéticas a gran escala podrían causar daños sin cuento al mundo industrializado. Estos asaltos, sigilosos y secretos, podrían incluso reclutar como peón a nuestro propio PC.

Salvo por la escala a que se desarrollan estos asaltos entre computadoras, tanto las efracciones promovidas por individuos como las acciones ciberbélicas de patrocinio estatal constituyen en esencia las dos caras de una misma perturbadora moneda electrónica. Desdichadamente, resulta difícil señalar la diferencia entre una y otra hasta que es demasiado tarde.

Aunque en el habla popular se los confunde con los virus, Código Rojo y otras plagas similares, como Melissa y SirCam, reciben en el vocabulario de germanías informático el nombre de gusanos. Los virus informáticos, remedos de sus homónimos biológicos, tienen que integrarse en otros programas para poder funcionar y replicarse. Un gusano informático es, por el contrario, un programa autónomo, capaz de replicarse por sí mismo; a menudo inflige mayor daño que un virus. Código Rojo encierra especial peligrosidad porque los ataques que realiza son del tipo "denegación distribuida de servicio" (DDdS, DDoS en sigla anglosajona), ataques que se proponen inundar a los ordenadores de Internet con un diluvio de llamadas, peticiones de servicio y comunicaciones sin valor.



En el clímax, que alcanzó en julio pasado, Código Rojo amenazó la Red consumiendo su anchura de banda, vale decir, su capacidad de transmisión de datos. "En la guerra cibernética, la anchura de banda es un arma", declara Greggory Peck, un ingeniero de seguridad cuya función es defender a los ordenadores "clientes" del gobierno estadounidense contra los delitos informáticos. En un ataque DDdS, un ordenador de control impone a muchos zombis que abrumen a la víctima con llamadas y comunicaciones sin valor, en un intento de ocupar toda la anchura de banda del atacado. Ofensivas de esta clase se abrieron paso hasta el público general el año pasado.

Pero los primeros incidentes DDdS concitaron sólo a unos centenares de zombis; millares a lo sumo. Ello fue debido a que los atacantes tuvieron que abrirse paso "a mano", por así decirlo, hasta cada candidato a zombi. Código Rojo se propaga en progresión geométrica, lo que proporciona centenares de veces más zombis y, por ende, una capacidad centenares de veces superior para saturar rápidamente toda la anchura de banda de que disponían en Internet.

El brote inicial de contagio del Código Rojo apenas pasó de un resfriado nasal. En los cinco días posteriores a su aparición, que fue el 12 de julio, sólo había alcanzado a unos 20.000 ordenadores de un colectivo estimado de medio millón de servidores IIS susceptibles de contagio. Cinco días más tardó en descubrirse el gusano.

El 19 de julio, el gusano se presentó de nuevo, bajo una forma más ponzoñosa. En menos de 14 horas, más de 359.000 servidores quedaron infectados con el gusano Código Rojo. Las retenciones de tráfico generadas por tan gran número de ordenadores que solicitaban conexión con otras máquinas comenzaron a sobrecargar la capacidad de Internet. A media tarde, el cancerbero de la industria de seguridad informática, el Internet

2. UN VIGILANTE DE LA RED. David Moore supervisó la rápida difusión de Código Rojo.

¿Qué pasa si Internet se viene abajo?

¿Qué consecuencias comportaría el hundimiento de Internet ante una ofensiva en masa de los cibervándalos? Afectaría a la manufactura de productos y a la entrega de bienes, a las transacciones bancarias, al sistema telefónico y un largo etcétera. Si el desplome se produjera dentro de cinco años, el desastre sería más devastador.

Son ya muchas las empresas que utilizan la Red para hacer pedidos u organizar sus envíos. Un desplome del sistema interrumpiría la fabricación "justo a tiempo", en la cual los componentes, para minimizar los costos de almacén e inventario, llegan a la línea de producción uno o dos días antes de su uso. Muchos comercios minoristas se basan en la Red para mantener surtidas sus estanterías. En plazo de días, podrían quedarse sin existencias.

Es posible que para entonces tampoco pudiéramos utilizar nuestro talonario de cheques ni la tarjeta del cajero automático, pues los bancos, para ahorrar gastos, recurren a Internet. Otras instituciones económicas, como Wall Street, son más susceptibles de corrupción de sus datos por cibergamberros que al cierre completo del sistema.

Mientras que la mayoría de los teléfonos seguirían funcionando si la Red se viniera abajo un día como hoy, los técnicos opinan que la situación cambiará dentro de pocos años. La telefonía por Internet comenzó siendo una forma de que aficionados de gustos técnicos pudieran hacer llamadas casi gratuitas a larga distancia. Ahora, sin embargo, muchas llamadas que tienen su origen en un receptor ordinario recorren parte del camino a través de la Internet pública. Incluso las propias comunicaciones no clasificadas de los servicios armados de EE.UU. se envían a través de NIPRNET, que utiliza comunicaciones públicas de Internet. El Departamento de Defensa depende en gran medida de NIPRNET.

—C.M.

Storm Center, anunciaba el estado de "alerta naranja", grado previo a la situación más comprometida, la alerta roja, que declara una avería que inutiliza el sistema.

A medianoche, todos los zombis del Código Rojo dejaron de buscar nuevas víctimas. Sí persistieron en inundar uno de los servidores de que dispone la sede de la Casa Blanca, abrumándola con conexiones sin valor, y haciendo temer su cierre. En el domicilio presidencial se cerró uno de sus dos servidores dinámicos de nombres (DNS), desviando todas las peticiones hacia el otro servidor. Por suerte, Código Rojo no fue capaz de habérselas con la dirección IP modificada y se dedicó a batallar contra la sede inactiva.

En la noche del 20 de julio, todos los zombis de Código Rojo existentes entraron en hibernación previamente programada. Dado que los gusanos sólo moran en la memoria RAM de cada ordenador, que es purgada al ser cerrada la máquina, fue suficiente reiniciar los equipos para erradicar los restos de Código Rojo. ¿Caso cerrado?

Dos o tres días después, los analistas revelaron que si se lanzara una nueva copia de Código Rojo entre el 1 y el 19 de un mes cualquiera (las fechas de activación que fueron codificadas por el facineroso original), la infección volvería a expandirse.

Durante los 10 días siguientes, voluntarios de seguridad informática estuvieron trabajando para notificar a los usuarios de Microsoft IIS que sus servidores eran vulnerables. El 29 de julio, la Casa Blanca mantuvo una conferencia de prensa para aconsejar a todo el mundo que protegiera sus servidores IIS contra los ataques de Código Rojo. "El tráfico masivo asociado con la propagación de este gusano podría llegar a degradar el funcionamiento de Internet", advirtió el director del Centro Nacional de Protección de Infraestructuras del FBI.

El segundo advenimiento de Código Rojo fue, como era de esperar, menos dañino que el primero. El 1 de agosto había infectado a unos 175.000 servidores —prácticamente, a todos los susceptibles—, la mitad que en el episodio anterior. Al ser menor la velocidad de infección y menor también el número de servidores infectados, las perturbaciones en Internet resultaron mínimas. Transcurrido cierto tiempo, el segundo ataque remitió.

Pero no fue ése el final. El 4 de agosto apareció otro gusano, que, para infiltrarse, se valía del mismo método que Código Rojo. Este nuevo gusano, bautizado Código Rojo II, instalaba un "portillo trasero", que permitía a un "Barón Samedi", al señor de los zombis, dirigir a su voluntad las actividades de los ordenadores victimizados. El gusano degradaba redes internas (*intranets*) con "avalanchas de arp" (riadas de paquetes de Ethernet) y salía a esclavizar nuevas víctimas. En breve plazo, Código Rojo II había dejado fuera de servicio ciertas secciones de Hotmail (un proveedor de correo electrónico en la Red), amén de varios proveedores de cable y de servicios DSL Internet (línea de abonado digital) más una sección del sistema de distribución de noticias de la agencia Associated Press. Con el tiempo, Código Rojo II consiguió infectar muchas redes internas de universidades y empresas. A mediados de agosto, Código Rojo II había dejado incapacitados a varios servidores de uso interno del gobierno de Hong Kong. Se cebó sobre servidores personales conectados a la Red y

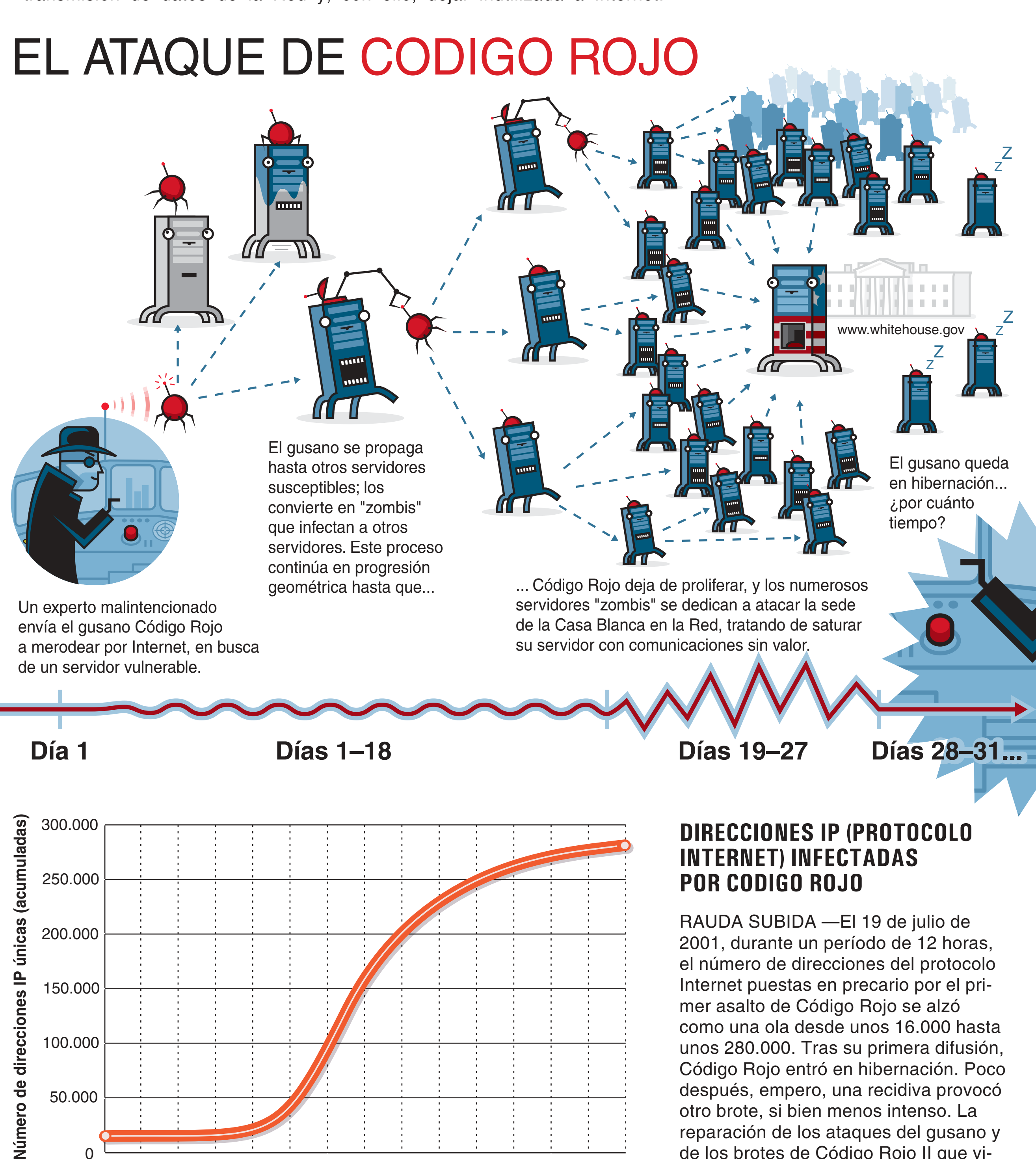
El autor

CAROLYN MEINEL, experta en seguridad informática, ha escrito varias obras sobre la delincuencia cibernética.

Los gusanos Código Rojo de Internet

Código Rojo es un gusano de Internet que infecta a los IIS de Microsoft (servidores de información en Internet de Microsoft IIS), sistema con el que funcionan muchas sedes muy populares de la Red. Durante el verano, los asaltos secretos del gusano convirtieron a los ordenadores IIS en "zombis" que realizaron un ataque denominado "denegación distribuida de servicio" sobre la sede de la Casa Blanca, tratando de inundarla con un diluvio de comunicaciones sin valor. Los gusanos más temibles pueden saturar la capacidad de transmisión de datos de la Red y, con ello, dejar inutilizada a Internet.

EL ATAQUE DE CODIGO ROJO



DIRECCIONES IP (PROTOCOLO INTERNET) INFECTADAS POR CODIGO ROJO

RAUDA SUBIDA —El 19 de julio de 2001, durante un período de 12 horas, el número de direcciones del protocolo Internet puestas en precario por el primer asalto de Código Rojo se alzó como una ola desde unos 16.000 hasta unos 280.000. Tras su primera difusión, Código Rojo entró en hibernación. Poco después, empero, una recidiva provocó otro brote, si bien menos intenso. La reparación de los ataques del gusano y de los brotes de Código Rojo II que vinieron tras él costarán varios millardos de euros.

gestionados mediante Windows 2000 Professional. Este sarpullido de trastornos indujo a declarar por segunda vez una alerta naranja. Alrededor de 500.000 servidores de uso interno se vieron en aprietos.

A mediados de agosto, Computer Economics, una compañía de investigación en seguridad, afirmó que Código Rojo había causado daños por valor de más de 2 millardos de euros. Cuando finalmente Internet haya quedado del todo expurgada de este gusano, es probable que su ataque se cuente entre los más costosos de la historia. El año pasado se destinaron unos 9 millardos de euros a la lucha contra el virus LoveLetter y, en 1999, la reparación de los daños provocados por el asalto del gusano Melissa costó otro millardo de euros largo.

No es Código Rojo el único gusano que merodea. Otros tienen su punto de mira orientado hacia los ordenadores domésticos. El llamado W32/Leaves, por ejemplo, permite a un atacante remoto controlar los PC infestados de forma coordinada, y activar desde ellos oleadas de ataques sincronizados. (Aunque también Código Rojo II consiente esta posibilidad, no cuenta con la codificación necesaria para permitir su control remoto.) El equipo de respuesta informática urgente de la Universidad Carnegie Mellon, financiado por el gobierno, ha recibido informes de más de 23.000 zombis W32/Leaves. Se desconoce el número total, pero dado que W32/Leaves continúa propagándose, es de prever que la población infectada crezca de forma importante. En julio de este año, Scotland Yard culpó a un joven de 24 años del lanzamiento de W32/Leaves.

Casi todos los ordenadores, sistemas operativos o programas que puedan adquirirse cuentan con puntos débiles por donde el fabricante sabe que pueden introducirse los cibervándalos. Una futura normativa del gobierno federal podría exigir que los fabricantes tomaran la iniciativa de ponerse en contacto con sus clientes y ayudarles a actualizar los productos que les han vendido, capacitándolos para solventar posibles fallos de seguridad. Pero de momento queda a cargo de cada usuario localizar y arreglar los métodos de que se valen los cibervándalos para violar los ordenadores.

Guerras cibernéticas mundiales

Además de la amenaza que plantean los programas maliciosos de los cibervándalos se ha de contar con el riesgo que entrañan los ataques a Internet concertadamente realizados por talentos informáticos de máximo nivel, que deciden actuar movidos por sucesos internacionales. Las batallas libradas en el ciberespacio tras la colisión de un caza chino con un avión espía norteamericano, el pasado mes de abril, nos ofrecen pistas sobre la forma en que podría desarrollarse un conflicto de este tipo.

Según reportajes de prensa, el toma y daca cibernético comenzó cuando las negociaciones para la devolución de los tripulantes estadounidenses entraron en vía muerta. Los días 9 y 10 de abril, los atacantes desfiguraron dos sedes chinas de la Red, a las que dirigieron calumnias, insultos e incluso amenazas de guerra nuclear. A lo largo de la semana siguiente, los norteamericanos atacaron varias docenas más de sedes chinas. Los ciberguerreros prochinos respondieron desfigurando una sede de la Marina estadounidense.

El bando chino guardaba, sin embargo, una bala en la recámara. A finales de marzo, el Centro Nacional de Protección de Infraestructuras había hecho saber que un nuevo gusano merodeaba a sus anchas: el gusano 1i0n. Su realización es atribuida a Lion, un experto informático fundador de una suerte de sindicato de ciberguerreros chinos. A diferencia de los zombis preprogramados de Código Rojo, los de 1i0n pueden aceptar instrucciones nuevas enviadas desde un ordenador central. Además, el gusano 1i0n es capaz de infestar ordenadores que operen con Linux, lo que significa que puede enmascararse bajo cualquiera de los ordenadores de la Red. Esta propiedad hace difícil la localización de los servidores infestados.

En el ínterin, los ataques de los pronorteamericanos aumentaron de escala. El *Diario del Pueblo*, órgano oficial del partido comunista, respondió que "a finales de abril, eran más de 600 las sedes chinas en la Red que se habían encontrado amenazadas". En cambio, durante el mismo período, las incursiones de los chinos solamente habían hecho impacto en tres sedes estadounidenses.

En los dos o tres días siguientes, varios grupos de efractores prochinos (el sindicato mencionado y otros cibervándalos "rojos", así se califican) asaltaron una docena de sedes norteamericanas con lemas como "¡Atacad la arrogancia sinófoba!". El 1 de mayo fueron lanzados varios ataques DDdS. A lo largo de la semana siguiente, los merodeadores chinos pudieron anotarse en su tanteador más de otras 1000 sedes estadounidenses.

El 7 de mayo, China reconoció su responsabilidad por los ataques DDdS e hizo un llamamiento a la paz en una sección de noticias del *Diario del Pueblo*. Decía así: "Se ha instado también a los expertos informáticos chinos para que abandonen toda acción irracional y reorienten su entusiasmo, tornándolo en vigor con el que edificar el país y salvaguardar la paz mundial".

Ni los organismos encargados de hacer cumplir las leyes, ni la Casa Blanca, ni las organizaciones norteamericanas de expertos en la Red pusieron nunca objeciones al bando estadounidense de este conflicto, a pesar de que el Centro de Infraestructuras del FBI había advertido de "la posibilidad de más intensa actividad de vandalismo informático dirigida contra los sistemas de los EE.UU.".

Guerra cibernética clandestina

En vista del episodio del avión espía, algunos comentaristas se han preguntado si el gobierno federal estadounidense animó a los ciberguerreros norteamericanos a convertirse en agentes de unas hostilidades cibernéticas. Después de todo, los EE.UU. habían trabajado

antes ya con grupos privados para librar guerras secretas, como en el caso del escándalo Irán/Contra. Y se ha informado de vínculos entre las dos comunidades. Aunque resulta difícil determinar el grado de vinculación entre cibervándalos y gobierno, algo podemos extraer de los indicios.

Según numerosos reportajes periodísticos y sus propias declaraciones, Fred Villella, hoy en el sector privado, tomó parte en actividades de contraterrorismo en los años setenta. En 1996 contrató a diestros ciberefractores de Dis Org Crew (Tripulación Dis-Org) para que le ayudasen a organizar sesiones de formación destinadas al personal de agencias federales sobre la amenaza de las raposas informáticas. Este grupo ayuda también en la infraestructura de personal del mayor congreso anual de ciberexpertos, la llamada Def Con.

Erik Ginorio (conocido por Bronc Buster en esta selva donde hay desde informáticos expertos hasta efractores facinerosos) admitió públicamente haber desfigurado en octubre de 1998 una sede oficial del gobierno chino dedicada a los derechos humanos. Esta fechoría es, en la legislación estadounidense, una acción ilegal. Pero Ginorio no sólo no fue procesado, sino que —afirma— Villella le ofreció empleo.

Otro contacto con el gobierno: una compañía californiana, Secure Computing, fue patrocinadora en 1996 de Def Con. Según sus informes a la comisión de valores estadounidense, Secure Computing fue creada bajo la dirección de la NSA (la agencia de seguridad nacional, brazo secreto del gobierno, que se encarga de la desencriptación de claves y de la vigilancia). Dos años después, Secure Computing contrató al propietario de Def Con, Jeff Moss. También varios de los antiguos instructores de Villella figuraban entre el personal o la gerencia de Def Con.

En 1997 Moss lanzó las reuniones informativas Black Hat. Un "sombrero negro" (*black hat*) es, en la germanía del lumpen informático, un habilidoso. En teoría,

¿Qué hacer para defender la Red?

Uno de los puntos más débiles para la protección de Internet es el ordenador personal del usuario doméstico. Los gusanos cibernéticos —programas autorreplicantes capaces de provocar una catástrofe en las operaciones por Internet— pueden convertir en "zombis" a los ordenadores personales, es decir, esclavizarlos para que ayuden a destruir otras operaciones informáticas. Especial atención merecen los gusanos capaces de llevar a término ataques de denegación de servicio (DDdS) sobre objetivos eficazmente elegidos y distribuidos. En ellos, los ordenadores zombis envían sobre una sede de la Red un diluvio de comunicaciones inútiles.

A los profesionales de la informática les están pidiendo que hagan llegar su voz hasta los usuarios domésticos, para que éstos comprueben si tienen zombis. "Ello se debe a que la peor pesadilla que tenemos en Internet —explica gráficamente un técnico— es la abuelita que mantiene su línea DSL de alta capacidad y anchura de banda permanente conectada para pujar en las subastas electrónicas." Una gran anchura de banda entraña que un zombi doméstico puede bombear grandes cantidades de basura a Internet, contribuyendo a anegar las sedes hacia las que apunta.

Podríamos pensar que nuestro ordenador doméstico está a salvo de tales asaltos porque pone automáticamente en servicio antivirus actualizados, o porque los programas que usamos están debidamente registrados y recibimos periódicamente comunicaciones electrónicas del vendedor ofreciendo nuevas versiones de su producto. De nuevo, pura conjetura. Pocos vendedores se sienten obligados a ayudar a los usuarios a mantener a raya a los intrusos.

Para complicar el problema de la seguridad, la mayoría de los PC nuevos estarán pronto utilizando el sistema operativo Windows XP, que permite "zócalos en bruto". Los "zócalos" son subprogramas encargados de generar los paquetes (las unidades mínimas de transmisión de datos) que transfieren información a través de las redes. Con la técnica de los "zócalos en bruto", los paquetes pueden ensamblarse de forma arbitraria, aun cuando ello infrinja los protocolos de seguridad. Fueron estos zócalos, por ejemplo, los que permitieron al gusano 1i0n agazaparse en servidores Linux falsificando direcciones de Internet. También permiten a los facinerosos informáticos la creación de paquetes malformados, capaces de provocar el bloqueo del ordenador que los reciba.

La persecución internacional de los delincuentes informáticos resultaría facilitada por la adopción del "Convenio sobre delincuencia cibernética", objeto de consideración por las 44 naciones del Consejo de Europa, que integra también a Estados Unidos, Canadá y Japón. Parte del tratado convertiría en delito la posesión o creación de instrucciones o programas para el delito informático, excepto cuando se trate de ensayos autorizados en un sistema informático o de su protección.

No falta, empero, controversia sobre estas restricciones. Al menos 35 grupos de presión se oponen al tratado porque consideran que restringe la libertad de expresión e invade la esfera de intimidad personal. Y resulta difícil hallar antídotos contra virus o gusanos si los investigadores no pueden estudiar ejemplares de los mismos en sus ordenadores.

Otra solución consiste en hacer que los servidores de Internet sean seguros. Con ese fin la comisión federal de comercio de los EE.UU. propuso en julio una reglamentación que exige que las compañías de servicios financieros protejan sus redes contra "amenazas previsibles". Es un paso en la dirección correcta.

—C.M.



3. UN VIROLOGO DE LA RED. Mark A. Ludwig escribe sobre virus y gusanos informáticos en su casa rural de Arizona.

estas reuniones tienen la finalidad de impartir formación sobre seguridad informática. Pero sus charlas más parecen lecciones sobre la forma de cometer delitos que sobre la defensa contra ellos. En una sesión, por ejemplo, los asistentes pudieron informarse sobre el programa "Eliminador de pruebas", al que se ponderó como capaz de "vencer exactamente a los mismos programas de investigación judicial utilizados por el Servicio Secreto de los EE.UU., el Departamento de Aduanas o el Departamento de Policía de Los Angeles".

Es de señalar que el gobierno estadounidense sí cuenta con medios formales para librar una guerra cibernética. El 1 de octubre de 2000, el Mando Espacial de los EE.UU. se hizo cargo de la misión Ataque por Red Informática para el Departamento de Defensa. Además, la Fuerza Aérea gestiona y mantiene activo su propio grupo de investigación sobre guerra de información, ubicado en San Antonio.

Viniera de donde fuere, parece que el asalto Código Rojo fue sólo una prueba para ver qué alcance tendría una guerra cibernética concertada. No se trató, empero, de un ensayo en toda regla. El gusano era demasiado ruidoso y fácil de detectar para ser mucho más que un acto de vandalismo o la comprobación de una idea.

Pero si los ordenadores zombis tuvieran una larga lista de objetivos y un mecanismo de control que permitiera la reorganización dinámica de blancos, podrían hacer que los servidores infectados con DDdS creasen mapas de direcciones de esos ordenadores a los que se recurre para obtener información, así de los distribuidores de parches con los que remendar los programas defectuosos, o los de las compañías de seguridad que analizan gusanos o dan información sobre respuestas a incidentes. El Código Rojo es ejemplo ilustrativo de que a un gusano no le resulta mucho más difícil obtener todos los sistemas vulnerables que obtener algunos de ellos. Bastará con que se expanda con rapidez suficiente.

Código Rojo ofrece ya bastante potencia letal para operadores nefandos. En la forma en que el gusano está programado podría permitir a los vándalos de Internet la preparación de una lista de sistemas infectados y tomar después el control de ellos.

Dedíquese un número adecuado de zombis a atacar un número suficiente de ordenadores diana, e Internet podría quedar inutilizable. Podrían incluso quedar bloqueados los mecanismos normales para repararla: la descarga de instrucciones y programas de eliminación de zombis y la capacidad para desconectar de la Red a los pícaros. Además, los cibergamberros están sin cesar haciendo públicas nuevas formas de irrumpir en ordenadores que podrían ser utilizadas por nuevos gusanos. Un atacante decidido podría lanzar a Internet gusanos devastadores uno tras otro hasta dejar inactivo el sistema.

PERFILES

Kate Wong

MEAVE G. LEAKEY: La búsqueda de antepasados perdidos

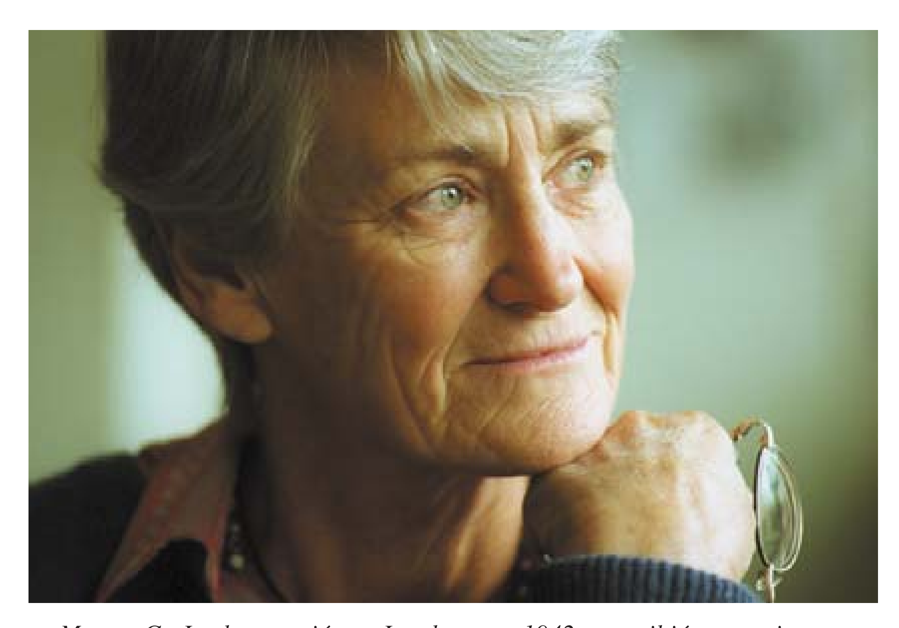
Nairobi (Kenia).— Cuando Meave Leakey vio por primera vez un cráneo humano de hace 3,5 millones de años, no pudo evitar un sentimiento de frustración. La hierba y las raíces de los árboles habían invadido el espécimen. Lo poco que sobresalía de la matriz rocosa estaba surcado de diminutas grietas. "Estaba hecho una pena", recuerda. El acento inglés colorea su voz reposada. La veterana paleoantropóloga desvía su mirada clara hacia el molde del fósil que descansa sobre su mesa. "Nunca pensé que sacaríamos tanto partido."

Tras un año largo de limpieza y análisis del cráneo y un fragmento de la mandíbula superior, exhumados en el distrito de Turkana (en el norte de Kenia), Leakey y sus colegas anunciaban en marzo que los restos pertenecían a un nuevo género y especie de homínido: *Kenyanthropus platyops*. El fósil presenta una miscelánea de características (entre las que destacan un rostro plano, dientes pequeños y una cresta en lo alto de su cabeza) que, en opinión de Leakey, lo disociaban totalmente del único homínido coetáneo que se conocía hasta entonces: *Australopithecus afarensis*, la especie a la que adscribe el esqueleto de Lucy. A quien, con sus congéneres, se consideraba desde hace mucho ascendiente de todos los homínidos posteriores —sin excluirnos a nosotros—, aunque sólo fuera porque todo lo que se conocía datado entre 3,5 millones de años y tres millones de años era *A. afarensis*. Mas si Leakey está en lo cierto, hace 3,5 millones de años existían —ya entonces— al menos dos linajes. Así que, según ella, resulta probable que *Kenyanthropus*, y no *Australopithecus*, diera lugar a nuestro propio género, *Homo*.

Una conclusión que no se ha recibido con aplauso unánime. No todos están de acuerdo con esta apreciación. Tim D. White, paleontólogo experto en homínidos primitivos que profesa en la Universidad de California en Berkeley, se inclina por atribuir los fósiles a una variante de *A. afarensis*. Otros aceptan la designación de la nueva especie pero debaten sobre el género. Por su parte, Leakey señala que será el tiempo —y más fósiles— quien repartirá y quitará razones. Pero insiste en que, de la misma manera que las últimas etapas de la evolución están caracterizadas por múltiples estirpes, también sería de esperar una diversidad entre los primeros homínidos. Y es que acabar con la idea de una evolución humana entendida como progresión rectilínea desde el primate cuadrúpedo hasta el hombre moderno erguido parece uno de los afanes de Leakey.

No es sorprendente que haya sacudido los cimientos de una tesis tan asentada sobre la evolución humana. Durante los más de 70 años que la familia buscó restos de nuestro pasado en Africa Oriental, los descubrimientos realizados por Louis y Mary Leakey, y más tarde por su hijo Richard, han forzado a los expertos a replantearse hipótesis arraigadas.

Meave entró a formar parte de esa familia renombrada tras su matrimonio con Richard en 1970. Asumiendo el mando de las expediciones anuales al lago Turkana en 1989 (Richard fue nombrado entonces director del Servicio de Vida Salvaje de Kenia) ha hecho perdurar la tradición familiar de buscadores de fósiles. Hoy Meave, sobresaliendo del bajorrelieve que proporcionan mapas de yacimientos y carteles de fósiles famosos de los Leakey que engalanan las paredes de su despacho en el Museo Nacional de Kenia, se diría la encarnación de su especialidad. Vale la pena conocer el camino que le condujo aquí.



Meave G. Leakey nació en Londres en 1942 y recibió sus primeras enseñanzas en un colegio de monjas

La mayor de tres hermanos, Meave Epps mostró un precoz interés en la historia natural, pasándose de niña horas sin cuento recogiendo escarabajos y otros insectos en el patio trasero de la casa de campo familiar en Kent. Acabó por matricularse en la Universidad de

Gales, donde se apasionó con la zoología marina. Pero tras licenciarse, la penuria de plazas para mujeres en esa especialidad la empujó a considerar otras opciones.

Su paso a la paleontología comenzó cierta tarde en que un amigo le señaló una oferta de trabajo que se publicaba en la última página de *The Times*, anunciando que Louis Leakey buscaba a alguien decidido a trabajar en un centro de investigación de primates en Kenya. Meave se lanzó a la primera cabina telefónica que encontró. No pudo oír mucho de lo que le dijo (estaba demasiado ocupada echando monedas al teléfono), pero se las arregló para concertar una entrevista y acabó en el centro de primates, a la vez que realizaba su doctorado sobre los huesos de los miembros anteriores de los monos modernos.

Pronto se topó con Richard, que se había hecho cargo de varios de los magramente financiados proyectos de Louis, su padre, mientras éste se hallaba en el extranjero. Richard trataba de cuadrar la contabilidad, recuerda Meave. La primera medida que tomó, dice con una media sonrisa, "fue llamarme para recriminarme que gastaba demasiado dinero". Más tarde la invitó a unirse al campo de trabajo del yacimiento paleontológico del lago Turkana. Corría el año 1968; y allí ha investigado desde entonces.

Los primeros años en Turkana fueron embriagadores. "Encontrábamos un homínido casi cada semana", recuerda. La cadencia con la que se desenterraban homínidos fósiles ha disminuido desde aquellos días (algo lógico si se tiene en cuenta lo poco que se conocía y lo poco que estaba explorado por entonces), mas no el ritmo de los descubrimientos sobre la evolución humana. Bajo la dirección de Meave, el trabajo de campo se ha vuelto mucho más específico. En vez de explorar nuevas áreas, ella y su equipo han regresado a sitios previamente explorados, en busca de respuestas ante cuestiones concretas sobre los homínidos primitivos.

Una de tales cuestiones es saber lo que impulsó a nuestros antepasados cuadrúpedos a salir de la selva hacia nuevos parajes. Según los datos que el equipo de Meave ha cosechado del enclave de Lothagam, pudo resultar importante la evolución de nuevas plantas. De acuerdo con sus hallazgos, hace más de siete millones de años, los arbustos, árboles, matorrales y otras plantas que utilizan la ruta metabólica C3 dominaban el paisaje. Tras esa etapa, sin embargo, las hierbas tropicales C4 se adueñaron del entorno, un cambio que pudo provocar la evolución de nuevos animales herbívoros, como insectos y microvertebrados, entre otros, que son del agrado de muchos primates.



Otros restos, aparte de los de homínidos, también intrigan a Leakey, que examina aquí un cráneo fósil de babuino

Esto, a su vez, puede haber sentado las bases del bipedismo. Alzarse sobre dos piernas, explica, habría extendido el radio de acción de nuestros antepasados cuando se trataba de recolectar bayas silvestres, insectos y huevos de aves para alimentarse; la selección natural favoreció el largo cuello de las jirafas por la misma razón. Meave prepara actualmente varios artículos donde desarrolla su hipótesis del bipedismo.

Claro que existen otras hipótesis. Algunos proponen que la locomoción bípeda era más eficiente que la cuadrúpeda; otros conjeturan que ponerse de pie proporciona una mejor perspectiva de los predadores, y no falta quien aventura que el bipedismo surgió como una manera de mantenerse fresco, porque en posición erguida el sol baña una menor porción del cuerpo. Pero Meave afirma que "todo eso son cuentos de hadas". Además, algunas de estas hipótesis descansan sobre lo que ella cree que es una idea equivocada. "Siempre se ha asumido que nuestros antepasados salieron erguidos de la selva a las praderas abiertas", apostilla. Los datos indican, por el contrario, que a veces se refugiaron en zonas más boscosas.

Llegaron pruebas de su tesis cuando su equipo encontró fósiles de homínidos en Kanapoi, otro yacimiento de Turkana, en 1994. Estos restos y otros de la cercana bahía Allia sacaron a la luz una nueva especie, a la que denominó *Australopithecus anamensis*. El homínido en cuestión exhibía señales claras de marcha erguida; con sus 4,1 millones de años de antigüedad hizo retroceder las pruebas del comienzo del bipedismo (así como el primer indicio de la existencia del género) en medio millón de años. Al igual que *A. afarensis*, parece que *A. anamensis* habitó en chaparrales y en bosques abiertos, como indicaban los restos contemporáneos de fauna que aparecieron en los yacimientos. Recientes descubrimientos de otros investigadores han extendido el registro de la locomoción bípeda aún más atrás en el tiempo, hasta quizás incluso seis millones de años.

Mirando hacia el futuro, Leakey espera descubrir detalles adicionales tanto de la trayectoria del bipedismo como sobre lo que considera el siguiente desarrollo en importancia de la evolución de los homínidos: la destreza manual. A ese fin, se propone volver al yacimiento del *Kenyanthropus* y a otros lugares de similar antigüedad para buscar restos postcraneales de su nuevo homínido. "Si se observa lo que conocíamos en 1969 en comparación con lo que sabemos hoy, es absolutamente increíble. Prácticamente cada mes se encuentra algo nuevo —señala. "No se hace uno idea de qué va a pasar o del cariz que tomarán las cosas."

Ciencia y sociedad

Edad de la Piedra

En los bosques centroafricanos

Las investigaciones arqueológicas han desvelado que los seres humanos conquistaron una gran variedad de ecosistemas a lo largo del pasado. Se creía, sin embargo, que los bosques húmedos tropicales eran zonas inhóspitas que frenaron la colonización humana hasta el advenimiento de la agricultura. Esa hipótesis acaba de desvanecerse. El trabajo que viene realizando, desde 1993, un equipo internacional ha demostrado por el contrario que los bosques tropicales centroafricanos empezaron a habitarse, como mínimo, hace 35.000 años.

El bosque húmedo tropical constituye un ecosistema complejo donde se desenvuelven un número muy alto de especies vegetales y animales. Se calcula que, de las 250.000 especies forestales que existen en el mundo, las dos terceras partes viven en los Trópicos. El cinturón forestal africano, que cubre un total de doce países, es el tercero en extensión, precedido por los bosques de la cuenca amazónica y del sudeste asiático. A pesar de su elevada biodiversidad, los bosques africanos se caracterizan por una reducida densidad numérica de animales y plantas y una amplia dispersión espacial de las especies.

La población humana está configurada por un mosaico etnolingüístico que engloba dos sistemas socioeconómicos diferentes: la caza-recolección y la agricultura de roza itinerante. Los cazadores-recolectores, convencionalmente conocidos como "pigmeos", están repartidos por todo Africa ecuatorial. Aunque la economía de estos grupos se basa en la caza y la recolección, obtienen más del 60 % de su dieta a través del intercambio con sus vecinos agricultores.

La escasez, variabilidad y dispersión de los recursos del bosque indujeron a algunos investigadores a suponer que los grupos cazadores-recolectores prehistóricos no pudieron instalarse en su interior hasta la colonización agrícola. Con la presencia de los agricultores, el bosque tropical aumentaría la productividad mediante la introducción de especies cultivadas.

Las exploraciones arqueológicas realizadas por los autores durante los últimos años en la República Democrática del Congo, Guinea Ecuatorial y Camerún han revelado, por el contrario, la existencia de numerosos asentamientos prehistóricos en el interior del cinturón forestal. Los resultados de la



1. *Excavaciones arqueológicas en un abrigo de granito del Parque Nacional de Monte Alen en el Cinturón forestal Centroafricano*



2. *Poblaciones cazadoras-recolectoras de la región de Ituri, noreste de la República Democrática de Congo*



3. Punta de lanza bifacial de la Edad de la Piedra Media del yacimiento de Mosumu, República de Guinea Ecuatorial

excavación de catorce yacimientos de la Edad de la Piedra Media y Tardía atestiguan una ocupación cazadora-recolectora de gran antigüedad. Miles de años antes de conocer la agricultura, los habitantes del bosque se alimentaron con los recursos forestales que les proporcionó el medio.

Los yacimientos descubiertos al aire libre en Camerún y Guinea Ecuatorial pertenecen a la Edad de la Piedra Media. La datación radiocarbónica ha proporcionado una cronología mínima entre 35.000 y 30.000 años. Pero podría quizá retrotraerse mucho, ya que en el yacimiento camerunés de Njuinye existen niveles arqueológicos más antiguos con industrias de aspecto arcaico que no han podido datarse.

Durante esa época la técnica necesaria para la explotación y manipulación de los recursos se valió de útiles de cuarzo y cuarcita; en alguna ocasión, de sílex, un material exótico en el entorno. Destacan las puntas lanceoladas de entre seis y doce centímetros de longitud, trabajadas bifacialmente mediante finos retoques, así como raspadores bifaciales, raederas, perforadores y cantos trabajados. Estos útiles fueron probablemente fabricados para la caza y la manipulación de especies vegetales.

Los yacimientos de la Edad de la Piedra Tardía, de la República Democrática de Congo y de Camerún, presentan una cronología que se remonta desde hace 19.000 años hasta tiempos bastante recientes. La técnica lítica se diversifica a lo largo de este período, acompañada probablemente de cambios en los patrones de subsistencia. Encontramos puntas de flecha, raspadores, buriles, picos, denticulados y útiles compuestos realizados predominantemente sobre cuarzo. Los restos botánicos hallados en los yacimientos de la República Democrática de Congo nos permiten reconstruir una economía basada en la explotación del *Canarium* africano, una burserácea, desde hace al menos 10.000 años.

Durante los últimos milenios, las industrias líticas aparecen aquí acompañadas de cerámicas y restos metalúrgicos. La introducción de estas nuevas técnicas refleja el intercambio con grupos productores locales, aunque podría tratarse también de una producción propia de estos asentamientos cazadores-recolectores. En cuanto a las estrategias de obtención de alimentos, los restos faunísticos de antílopes, primates, pequeños bóvidos y puercoespines evidencian la existencia durante este período de prácticas cinegéticas, acompañadas de la recolección de moluscos terrestres y de la explotación de *Canarium* africano y aceite de palmera. A lo largo del Holoceno reciente la explotación de especies oleaginosas se intensifica.

Estos hallazgos demuestran sin ambigüedad que los seres humanos se adaptaron a un ecosistema forestal y adoptaron diferentes estrategias de subsistencia y patrones de ocupación con milenios de anterioridad a la aparición de las primeras poblaciones agrícolas.

RAQUEL MARTÍ
Dpto. Prehistoria,
Facultad de Geografía e Historia,
U.N.E.D., Madrid
JULIO MERCADER FLORÍN
Dpto. Antropología,
Universidad George Washington,
Washington D.C.

Tratamiento de residuos

Dioxinas

La gran cantidad de residuos que se generan como resultado de la actividad humana plantea graves problemas de gestión. La solución pasa por una estrategia integral que abarque desde la recuperación, reciclado o reutilización, hasta la deposición en vertederos controlados.

En la mayoría de los países avanzados se prima la revalorización de los residuos, basada en la incineración, es decir, en la aplicación de tratamientos térmicos controlados. Con más de un siglo de antigüedad, esta operación de ingeniería química consiste en la descomposición térmica oxidativa de los materiales. Mediante la incorporación de nuevas técnicas se reducen sustancialmente el peso y el volumen del residuo, a la vez que se recupera la energía liberada en forma de electricidad.

Recientemente se ha introducido un nuevo método. Se trata de la co-incineración, o aprovechamiento de los residuos para combustible en aquellas instalaciones cuyo principal objetivo es la generación de energía o la elaboración de productos finales.

Todos los métodos seguidos presentan inconvenientes. En los procesos térmicos, en particular, el tratamiento del residuo en plantas incineradoras exige abordar las cenizas, las escorias, los gases emitidos a la atmósfera y las aguas residuales, materiales de rechazo que contienen productos derivados de la combustión (HCl, HF, CO, CO_2, NO_x, SO_2 y metales pesados).

Aunque el control de algunos de estos contaminantes no ofrece dificultades técnicas, lo cierto es que la incineración y la co-incineración encuentran creciente oposición en la opinión pública, que teme una incidencia negativa de tales emisiones sobre la salud o el medio. Animadversión que ha cobrado mayor fuerza con la vinculación de la presencia de dioxinas y furanos en la práctica de estas actividades.

Las policlorodibenzo-p-dioxinas (PCDD) y los policlorodibenzofu-

Dibenzofuranos policlorados (PCDF)

O Cl_x Cl_y

Dibenzo-p-dioxinas policloradas (PCDD)

9 O 1 8 2 7 3 O 6 4 Cl_x Cl_y

1. Fórmula general de los furanos y las dioxinas

ranos (PCDF), más comúnmente conocidos como dioxinas y furanos, constituyen dos grupos de hidrocarburos aromáticos halogenados que engloban un total de 210 compuestos diferentes, cuya estructura molecular se muestra en la figura 1. Se caracterizan por una elevada estabilidad química y térmica, así como por su tendencia lipofílica. Tales propiedades las convierten en sustancias contaminantes altamente persistentes, capaces de experimentar fenómenos de bioacumulación y de acceder con relativa facilidad a los diferentes niveles de la cadena trófica.

Pero ni todas las dioxinas ni todos los furanos son tóxicos. En tal categoría debemos incluir sólo las especies moleculares que presentan cloro en las posiciones 2, 3, 7 y 8, lo cual reduce el número de sustancias agresivas a 17: siete dioxinas y diez furanos. Tampoco todas las dioxinas tóxicas alcanzan el mismo grado de toxicidad; ésta disminuye al aumentar el grado de cloración. La dioxina más agresiva es la 2,3,7,8 tetraclorodibenzo-p-dioxina (TCDD), declarada sustancia cancerígena por la Organización Mundial de la Salud en febrero de 1997.

Las PCDD y los PCDF son compuestos antropogénicos que aparecen como subproductos no deseados en determinadas actividades industriales. Se forman en los procesos de blanqueo de papel con cloro, los procesos de incineración, las emisiones gaseosas derivadas de la industria metalúrgica o en la combustión de gasolina, por citar sólo algunos ejemplos. Se dan también en las erupciones volcánicas.

La Directiva Europea 2000/76/CE, relativa a la incineración de residuos, establece que los valores medios de emisión de PCDD y PCDF no han de sobrepasar el valor de referencia de 0,1 nanogramo I-TEQ/Nm^3. Hasta hoy las plantas incineradoras vienen aplicando medidas primarias y secundarias para la reducción de las emisiones. Las medidas primarias se refieren a la óptima gestión del proceso de combustión. Aunque con las medidas primarias se consigue reducir los niveles de PCDD y PCDF, resulta difícil alcanzar el límite establecido de 0,1 ng I-TEQ/Nm^3. Por eso se completan con medidas secundarias, entre ellas la instalación de modernos sistemas de depuración de gases. Sirvan como ejemplo las modificaciones realizadas en las plantas incineradoras de Moncada y Reixac o San Adrián de Besós, en la provincia de Barcelona.



2. Planta incineradora de Tarragona

Una planta incineradora bien gestionada no solamente deja de ser una fuente de emisión de dioxinas, sino que, además, en el balance global, la concentración de las que se forman como consecuencia de los procesos de enfriamiento de los gases de combustión puede ser inferior a la cantidad de dioxinas destruidas a lo largo del proceso.

Los estudios realizados en la planta incineradora de Tarragona (SIRUSA) corroboran que ese fenómeno se da en los casos en que los niveles de dioxinas presentes en la material destinado a incinerar supera los 15 ng I-TEQ/ kg de RSU (*véase la figura 2*). Cierto es que no podemos generalizarlo a cualquier instalación, sino que obedece a unas condiciones muy concretas de operación derivadas de un alto rendimiento de los sistemas de depuración de gases para reducir al máximo los niveles de emisión de dioxinas y furanos.

ESTEBAN ABAD HOLGADO
Laboratorio de Espectrometría
de Masas y Laboratorio de Dioxinas
Dpto. de Ecotecnologías,
IIQAB-CSIC, Barcelona

Avances en inmunología

Complejos TCR/CD3

La capacidad de los individuos para defenderse de virus, bacterias y otros parásitos (protozoos o nemátodos, por ejemplo) depende, en última instancia, de los linfocitos T. La falta, aunque sea parcial, de esta población de leucocitos tiene efectos devastadores, como pone de manifiesto la pérdida de los linfocitos T CD4+ en el curso de la infección por el virus del sida.

Para activar su potencial defensivo, los linfocitos T dependen del "complejo TCR/CD3", un conjunto de proteínas anclado en su membrana celular. El complejo consta de dos componentes: TCR y CD3.

El componente TCR (de "T Cell Receptor", o receptor de células T) es una molécula de dos cadenas proteicas (α y β) con cierta semejanza estructural con los anticuerpos. Al igual que éstos, el TCR está dotado de una variabilidad que permite a cada linfocito reconocer uno entre millones de posibles "antígenos", o componentes ajenos. Los antígenos reconocidos por los linfocitos T se encuentran asociados a las moléculas de histocompatibilidad en la membrana de otras células y son, típicamente, pequeños fragmentos de proteínas procedentes de organismos patógenos.

El componente CD3 es, a su vez, un conjunto de distintas cadenas proteicas denominadas CD3γ, CD3δ y CD3ε. Estas cadenas, junto con dos cadenas ξ, tienen como función fundamental servir de "transmisor de señales" cada vez que el receptor TCR reconoce su antígeno específico (*véase la figura*).

Las señales generadas ponen en marcha los mecanismos celulares dirigidos a aumentar el número y eficacia de los linfocitos T encargados de responder a la infección. Resulta, pues, palmario el interés entre los inmunólogos por conocer la estructura y las funciones de los componentes del complejo TCR/CD3.

Desde 1999, con la participación de grupos españoles del Consejo Superior de Investigaciones Científicas y la Universidad, se han venido produciendo avances significativos en la comprensión del complejo TCR/CD3, poniendo de paso en tela de juicio los modelos comúnmente aceptados acerca del mismo, en varios aspectos clave.

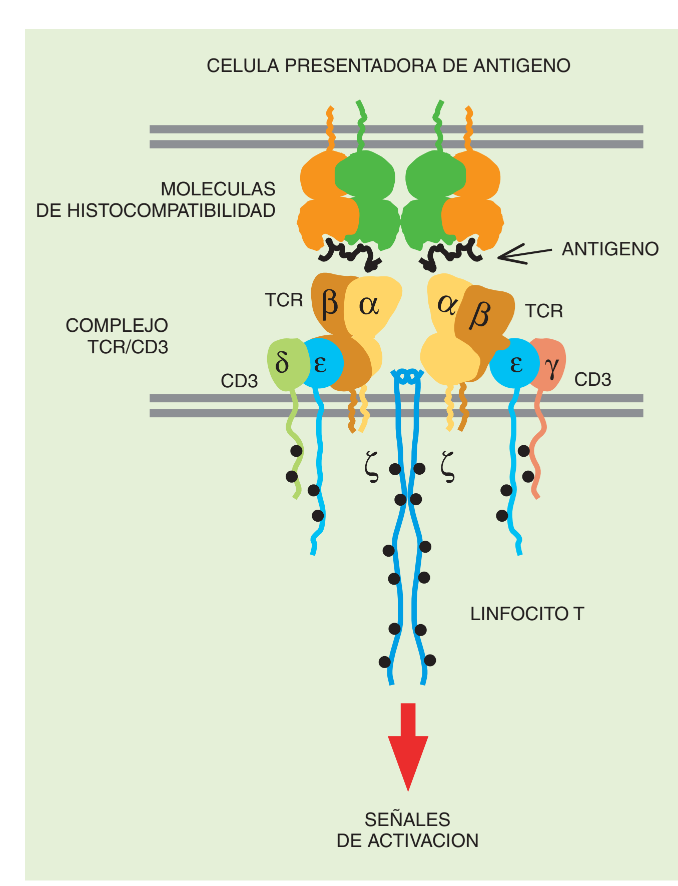
En primer lugar sobre el número y disposición de las cadenas. Se admitía un complejo compuesto por un TCR (α/β) al que se asocian un dímero ξ y 2 cadenas de CD3ε, una formando un dímero con CD3γ y otra con CD3δ (TCR-CD3 ε,γ/CD3 ε,δ/ξ-ξ). En cambio, los nuevos datos sobre ensamblaje del complejo y la asociación de distintos TCR apoyan una estructura de dos TCR por complejo. Cada uno de los TCR asociaría un dímero de CD3 (TCR-CD3 ε,γ/TCR-CD3 ε,δ/ξ-ξ).

En segundo lugar, se consideraba axiomática la "invariabilidad" de CD3, en un doble sentido: los complejos TCR/CD3 son esencialmente semejantes en estructura general y propiedades en todas las células T, y cada una de las cadenas de CD3 es igual en todos los complejos. Esta idea se ve cuestionada por resultados obtenidos en células carentes de una de las cadenas de CD3 (CD3γ), en las que se observan diferencias sustanciales en la estructura de los complejos TCR/CD3 entre dos tipos de linfocitos T con funciones distintas, los denominados CD4+ y CD8+.

Además, un trabajo publicado recientemente por nuestro grupo del Centro de Investigaciones Biológicas del CSIC, en colaboración con investigadores del Instituto de Salud Carlos III y de la facultad de medicina de la Universidad de Yale, cuestiona la idea misma de la invariabilidad de las cadenas de CD3. Demostrábamos allí que la secuencia de la cadena CD3ε podía variar en uno de sus extremos. Esta variabilidad, debida a la acción de enzimas proteolíticas del grupo de las metaloproteasas, afecta al grado de cohesión entre los componentes del complejo TCR-CD3 y a su estructura.

De acuerdo con nuestros resultados, habría distintas conformaciones del complejo y, lo que parece más importante, que estas diferencias podrían afectar a la sensibilidad del complejo a la activación por antígeno. De confirmarse esta posibilidad, habría que investigar el control de las respuestas a antígeno mediante inhibidores de metaloproteasas, abriendo nuevas posibilidades terapéuticas en alteraciones como enfermedades autoinmunitarias y alergias.

JOSÉ MARÍA ROJO
Dpto. Inmunología
Centro Investigaciones Biológicas, Madrid



Elementos básicos del reconocimiento de antígenos por linfocitos T. El TCR reconoce específicamente péptidos (antígenos) *asociados a moléculas de histocompatibilidad; las cadenas CD3 y ξ inician entonces las señales de activación al fosforilarse en tirosinas citoplasmáticas* (círculos)

Deslizamientos en los Pirineos

Aumento de la actividad

A pesar de su apariencia inmutable, el relieve de las grandes cordilleras experimenta continuas modificaciones. Los desprendimientos y deslizamientos son fenómenos habituales en laderas empinadas, compuestas por materiales rocosos fracturados o por terrenos arcillosos.

Los agentes que con mayor frecuencia desencadenan la inestabilidad de las laderas son los episodios lluviosos y las sacudidas sísmicas. En los Pirineos, al igual que en el resto de cordilleras, las laderas persisten inestables desde tiempos prehistóricos.

A diferencia de otros peligros naturales, como los terremotos, los desprendimientos y deslizamientos ocurren de manera dispersa en el territorio. Este hecho y la baja densidad de población de las regiones montañosas explican por qué su actividad pasa a menudo inadvertida; sus efectos suelen atribuirse erróneamente a la acción de las crecidas torrenciales.

Son muchas las poblaciones amenazadas por la inestabilidad de las laderas, forzadas a veces a una obligada evacuación, como aconteció en Puigcercós o Pont de Bar. Los daños que generan en España los deslizamientos se evalúan en decenas de miles de millones de pesetas anuales con una clara tendencia a aumentar debido a una creciente presencia humana en las zonas de montaña.

Aunque existen deslizamientos que se hallan en permanente actividad, la mayoría de los circunscritos a la región pirenaica se encuentran en estado latente, reactivándose de forma periódica con las lluvias. La dispersión de los movimientos y su situación remota hace que se ignore cuándo se producen las reactivaciones, excepto en los casos en que se ven afectadas infraestructuras importantes o núcleos habitados.

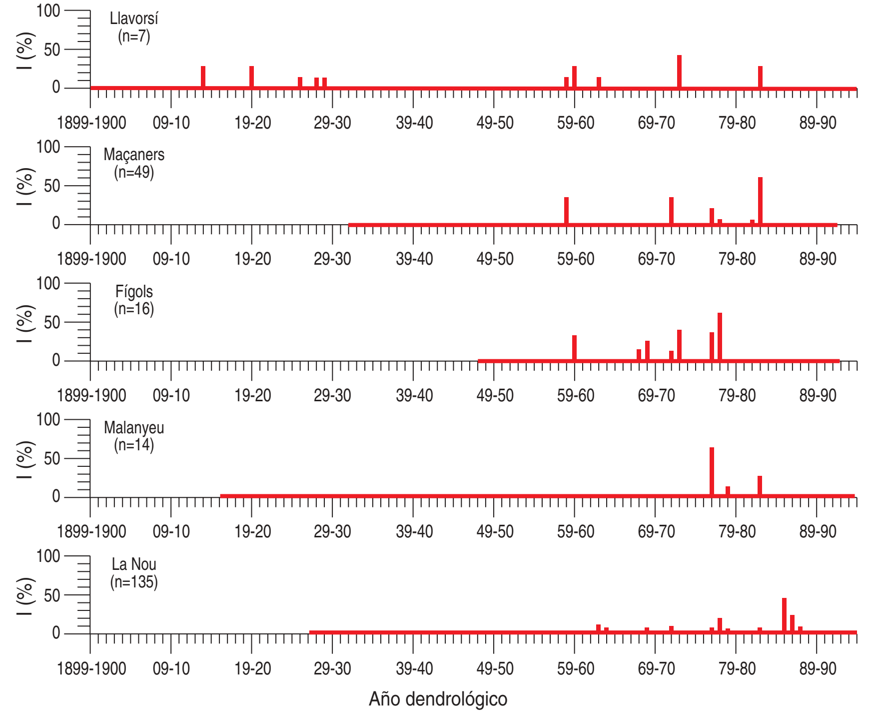
Para conocer con qué frecuencia se inestabilizan las laderas hay que acudir, pues, a métodos indirectos. Resulta evidente la utilidad de contar con una información sólida para comprender las relaciones entre el régimen de lluvias y el desencadenamiento de los movimientos de ladera, evaluar la probabilidad de ocurrencia, adoptar medidas de protección o establecer dispositivos de alerta y evacuación.

Un reciente estudio sobre diversos deslizamientos en el Pirineo catalán, mediante técnicas dendrocronológicas, nos ha permitido avanzar en el conocimiento de la frecuencia de las reactivaciones. El trabajo se basa en la identificación de los episodios de reactivación a partir de las respuestas observadas en los árboles implicados en los deslizamientos. La deformación de la superficie del terreno que acompaña al movimiento y el desplazamiento de bloques causa la inclinación, herida y rotura de los troncos, la exhumación de las raíces y, en el caso más extremo, su arrasamiento.

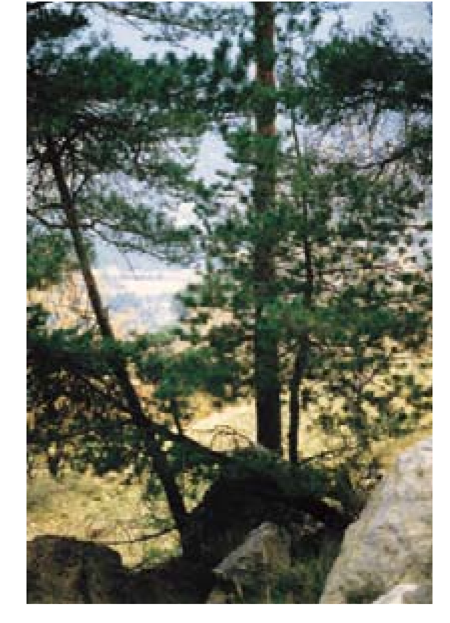
Cada una de las perturbaciones mencionadas provoca en los árboles cambios morfológicos, fisiológicos y estructurales que quedan reflejados en los anillos de crecimiento y son perfectamente identificables, incluso después de la muerte del organismo.

La respuesta de los árboles varía con la perturbación sufrida. Puede aquélla consistir en la formación de una madera más densa y oscura que la normal (madera de reacción), en el crecimiento excéntrico de los anillos que les permita recuperar la verticalidad o en la cicatrización de las heridas provocadas por el impacto de bloques. La rotura de las raíces o el agrietamiento del suelo puede privar al organismo del adecuado flujo de agua subterránea y aporte de nutrientes, lo que resulta en una situación de estrés que dará lugar a un menor grosor de los anillos de crecimiento. Por el contrario, la muerte de otros árboles vecinos reducirá la competencia por los alimentos, con el aumento consiguiente del grosor de los anillos.

La extracción de muestras de los troncos mediante barrenas especiales permite detectar el tipo de respuesta y determinar cuándo tuvo lugar el evento perturbador —en



1. Episodios de reactivación de algunos deslizamientos en el Pirineo catalán deducidos del análisis dendromorfológico. I: índice de actividad (porcentaje de árboles que muestran respuesta al deslizamiento en sus anillos de crecimiento); n: número de árboles muestreados en cada deslizamiento; la línea gruesa horizontal indica el período de tiempo cubierto por los árboles muestreados



2. Arboles inclinados por efecto del impacto de bloques desprendidos en Pedra, en el Pirineo

este caso, el deslizamiento— con la precisión de un año.

En el Pirineo catalán, el registro de las reactivaciones producidas durante los últimos 80-100 años obtenido con este procedimiento revela un fenómeno notable: la frecuencia de los deslizamientos no se ha mantenido constante en el tiempo, sino que alternan los períodos de mayor actividad (deslizamientos más frecuentes) con períodos de aparente estabilidad. Entre 1930 y 1959 no se detectaron reactivaciones, mientras que desde 1959 las reactivaciones se han venido sucediendo con una periodicidad de unos tres años de promedio. El número limitado de deslizamientos muestreados y su distribución zonal no permite, por el momento, extrapolar las conclusiones al conjunto de la cadena montañosa.

El aumento reciente de las reactivaciones de los deslizamientos se ha observado también en los Alpes, Cárpatos, Escandinavia y las Montañas Rocosas. En la mayoría de las regiones mencionadas se contempló un período de relativa inactividad con una duración de 20 a 40 años, durante las décadas centrales del siglo XX. No obstante, este período de relativa calma no fue simultáneo en toda Europa, diferencias regionales que persisten.

Resulta todavía prematuro plantear si el aumento reciente de la actividad resulta de los efectos de un cambio climático. No puede descartarse que dicho incremento se deba a la variabilidad cíclica del clima (de carácter decenal) que dio lugar a períodos de actividad en los Alpes en la mitad del siglo XIX y entre 1900 y 1930.

JORDI COROMINAS y JOSÉ MOYA
Universidad Politécnica de Cataluña

Barrido selectivo de los genes

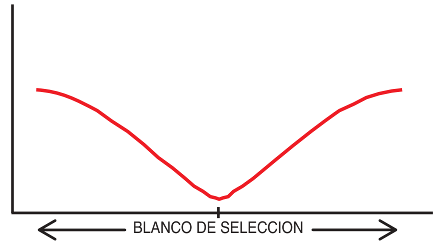
Naturaleza y función

Con la técnica de secuenciación de ADN, desarrollada hace 20 años, se ha recabado abundante información sobre la evolución a nivel molecular. Aunque sigue siendo motivo de debate la importancia relativa de las distintas fuerzas implicadas, se da por sentado el papel determinante de la selección natural.

En el ámbito de la evolución molecular, conviene distinguir entre selección positiva de una mutación favorable, que se expresa en el aumento de probabilidad de su fijación, y selección negativa contra una mutación, que se elimina de la población. Se llama barrido selectivo al proceso de fijación de una mutación favorable y selección de fondo a la selección negativa. En virtud de esta segunda forma de selección se reduce también la variabilidad del ADN en regiones adyacentes.

Las regiones físicamente adyacentes al ADN implicado en la mutación se benefician también del barrido selectivo. Se privilegia su presencia en la población ("sobrerepresentación"); dicho de otro modo, el nivel de la variación de ADN en tales regiones será menor del normal. La magnitud del cambio genético depende del nivel de recombinación en la región particular de interés.

El nivel de recombinación, o intercambio de secuencias de ADN entre cromosomas homólogos, se halla en estrecha relación con la distancia mutua entre los segmentos a mezclar. A mayor separación, mayor nivel de recombinación.



Distribución teórica del nivel de variabilidad nucleotídica cuando aumenta la distancia del blanco de selección (un gen o mutación favorable en el caso de selección positiva). El eje de ordenadas representa el aumento de variabilidad nucleotídica. Las flechas bajo el eje de abscisas indican el aumento de distancia del blanco de selección

No es fácil distinguir de la selección de fondo el barrido selectivo, pese a la infinidad de propuestas esbozadas. Se admite, no obstante, que, comparado con el papel principal de la selección de fondo en la evolución molecular, la función atribuible al barrido selectivo es mínima.

Hace unos tres años, aportábamos la identificación del primer blanco de selección de un barrido selectivo cuya función es conocida en *Drosophila melanogaster*. Dábamos cuenta también de la formación *ex novo*, por recombinación, del gen de la dineína axonémica, *Sdic*, tres millones de años atrás. Comprobamos, además, que los genes adyacentes de *Sdic* ofrecen una escasa variabilidad de nucleótidos, de acuerdo con lo que cabe esperar de un suceso genético debido a un barrido selectivo.

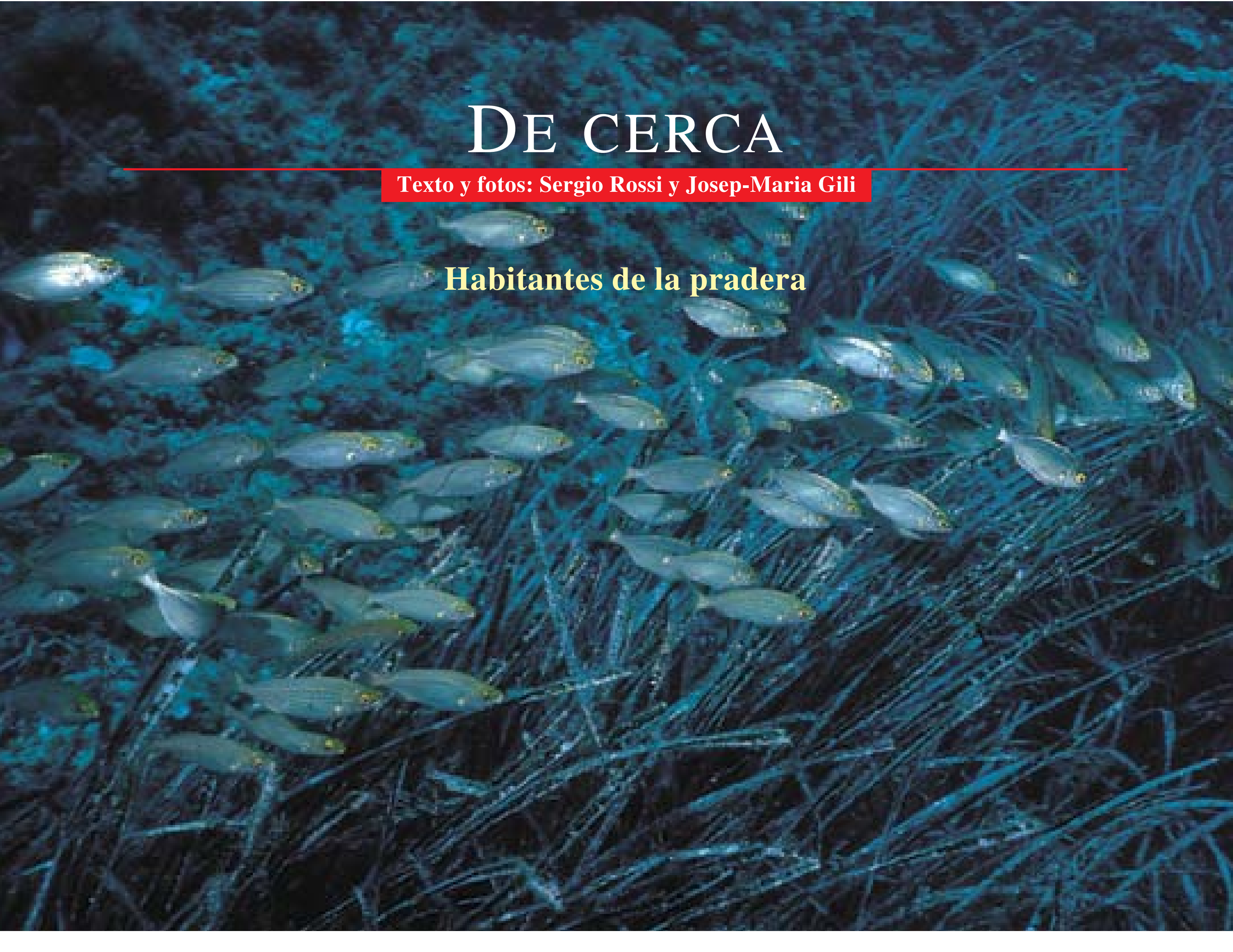
Hoy sabemos que el producto de *Sdic* parece intervenir en la movilidad del esperma; en concreto, a él cabe asignar el aislamiento reproductor y la subsiguiente especiación de *D. melanogaster* desde su especie hermana *D. simulans*. Queda, pues, patente la acción del barrido selectivo en la evolución molecular, aunque sólo conozcamos, de momento, un solo caso de su intervención en la formación de una nueva especie.

DANIEL DE AGUIAR
y DMITRY I. NURMINSKY
Universidad de Harvard, Cambridge (EE.UU.)

DE CERCA

Texto y fotos: Sergio Rossi y Josep-Maria Gili

Habitantes de la pradera



1. La pradera de Posidonia oceanica *crea una estructura tridimensional capaz de producir un intenso reciclaje de nutrientes y alimento, debido en parte a su capacidad de modificar el hidrodinamismo circundante*

Las praderas de fanerógamas marinas han conseguido el estatuto de especie protegida. Su capacidad de estructurar el entorno, de reciclar y sacar el máximo provecho de los nutrientes que la rodean, de formar espesas matas que protegen a juveniles de varias especies de animales y de albergar una diversidad biológica elevada ha sido la clave para tal decisión.

Quizá la más emblemática de estas plantas que retornaron a aguas abiertas hace millones de años en el mar Mediterráneo sea la que conforma el "alguero": *Posidonia oceanica*. Entre sus hojas, tallos y raíces vive una nutrida flora y fauna con diversas funciones: aprovechan la estructura tridimensional, el hidrodinamismo particular circundante, la retención de partículas y el alimento que la mata puede proporcionar de forma directa (hojas) o indirecta (microorganismos, algas pluricelulares e invertebrados sésiles epibiontes de su estructura) en un complejo entramado de relaciones tróficas.

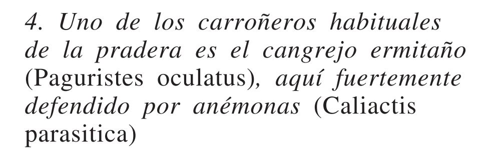
Encontramos, por ejemplo, todos los representantes de las distintas familias de equinodermos, que sacan su propio partido del alimento que les ofrece la pradera. Los erizos de mar comen algas epífitas o las propias hojas; las estrellas se dedican al carroñeo; filtran partículas en suspensión los lirios de mar, y las holoturias extraen su dieta de los detritus del sedimento.

Semejante diversidad se entiende si advertimos que la estructura de la pradera conforma distintos substratos "efímeros" y "perennes". Así, las hojas aparecen y desaparecen estacionalmente, dando la oportunidad a organismos de crecimiento rápido a desarrollarse de forma acelerada y cerrar sus ciclos reproductores; los rizomas (leñosos) en cambio, aunque también posean un crecimiento estacional, perduran mucho más, y los organismos que se instalan en ellos pueden desarrollarse con mayor parsimonia. Por estos motivos se ha considerado *Posidonia oceanica* un bioconstructor (como los arrecifes de coral), es decir, un organismo capaz de crear una estructura compleja donde se cobijan otros organismos en un entorno propio.



*2. Dos ejemplos de equinodermos con estrategias tróficas muy diferentes: el erizo común (*Paracentrotus lividus*, abajo derecha), que es un herbívoro, y el lirio de mar (*Antedon mediterraneum*, arriba, en las hojas), que es un filtrador*

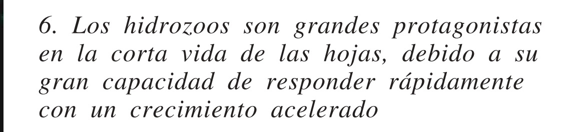
3. Este cerianto (Cerianthus membranaceus) *suele merodear por lugares no muy tupidos de la pradera para poder expandir por completo sus tentáculos*



4. Uno de los carroñeros habituales de la pradera es el cangrejo ermitaño (Paguristes oculatus)*, aquí fuertemente defendido por anémonas* (Caliactis parasitica)



5. En la base visible de la planta (rizoma) medran infinidad de organismos de vida más larga que los de las hojas (más efímeras), como estos gusanos poliquetos que conforman una colonia



6. Los hidrozoos son grandes protagonistas en la corta vida de las hojas, debido a su gran capacidad de responder rápidamente con un crecimiento acelerado



Circulación vial y telemática

La telemática ha entrado en el coche para adueñarse de todo: partes de tráfico personalizados, mensajes verbales de correo electrónico, juegos de vídeo y un creciente etcétera. Pero, ¿podemos confiar en su seguridad?

Steven Ashley

La aguja señala que el combustible se agota. El enorme camión con remolque se ha tragado otro depósito más de gasóleo. Esta vez, sin embargo, es de noche, y delante no hay más que una solitaria autopista que se hunde en la oscuridad. De vez en cuando aparecen salidas hacia pequeñas poblaciones, pero no siempre se indica a qué distancia están de la ruta ni si en ellas habrá gasolineras. Cuando el conductor empieza a escudriñar el mapa recuerda que el camión posee un sistema telemático activado por voz, un equipo inalámbrico de comunicación bidireccional conectado a la vez a Internet y a un localizador del sistema mundial de posicionado (GPS). Basta con presionar un botón del salpicadero y decir "Gas". Transcurrida una pausa, una voz mecanizada lee una lista de estaciones de servicio próximas, indicando la marca que abastecen, la distancia a que se encuentra cada una, hasta el precio por litro del combustible sin plomo. Aunque esté algo más lejos, el conductor elige el tercer elemento de la lista verbalizada porque dispone de una tarjeta de crédito para esa determinada marca. La voz electrónica le responde con instrucciones pormenorizadas para llegar al oasis salvador.

Más pronto o más tarde esta escena será habitual al popularizarse las técnicas de telemática en la automoción. Así como los microprocesadores inundaron los vehículos a motor en el pasado decenio, habrá una transición igualmente sostenida a la telemática a medida que los nuevos coches y camiones incorporen el equipo necesario en los próximos años. A bordo sólo se necesita el transmisor y receptor por radio, la antena, un equipo elemental para reconocimiento de voz y conversión de texto a voz, y una típica unidad GPS para prestar lo que los profesionales llaman un servicio telemático "de cliente sencillo", con las características más esenciales de la comunicación móvil. Aunque el paquete de servicio básico sea relativamente simple y su sustitución parezca inevitable, la industria tendrá pronto que encarar los complejos problemas de seguridad e intimidad que esta técnica plantea.

En cualquier momento, en cualquier lugar

La telemática en la automoción se basa en la idea de que los conductores de hoy exigen, en cualquier momento y en cualquier lugar, un acceso instantáneo a servicios de seguridad, navegación y utilidad diversa, así como a programas de entretenimiento. Con la misma impaciencia de los analistas financieros al describir el comercio electrónico hace media docena de años, se espera ya que las incipientes técnicas telemáticas modifiquen los procesos de interacción con los coches.

Los servicios de seguridad y protección dentro del vehículo —tales como la ayuda de emergencia en la carretera, la notificación automática de colisiones y la apertura de puertas a distancia bloqueadas— van siendo ya más familiares para los automovilistas. Los abonados a servicios telemáticos de alta calidad empiezan a disfrutar de servicios más refinados: mensajes verbales de correo electrónico, música digital y partes actualizados sobre el tráfico y el clima, además de noticias, deportes e informes de bolsa a la carta. En el salpicadero de los modelos de lujo hay pantallas LCD en color donde aparecen desplegados mapas de navegación y otros instrumentos de ayuda.

Con vistas al futuro, la ingeniería busca la manera de evitar que las pantallas se incorporen al salpicadero, pues tienden a quedarse anticuadas con relativa rapidez, y recurre a una nueva técnica integrando un adjunto digital personal (PDA, *personal digital assistant*) en el sistema del vehículo por medio de un soporte acoplado que se montaría en el centro. El PDA serviría de interfaz visual. Permitiría incluso la transferencia automática al vehículo de informaciones personales del conductor, como, por ejemplo, las preferencias sobre marcas de combustible o restaurantes, los ajustes de posición del asiento, las rutas de transporte habituales y el programa de trabajo diario.



1. LA PRUEBA DE CONDUCCION VIRTUAL de la técnica telemática de automoción a bordo es una de las funciones del simulador nacional avanzado de conducción (*arriba y página opuesta*), que ha abierto recientemente la Administración Nacional de Seguridad del Tráfico en Autopistas en la Universidad de Iowa.

Un futuro prometedor

En el sector se da por cierto que, en 2005, la mitad de todos los coches nuevos incluirán dispositivos telemáticos. Hay quien augura un crecimiento exponencial del negocio de la telemática. Si bien la telemática en su expresión más sencilla no es nueva —las radios en AM/FM, en banda ciudadana, y los teléfonos celulares llevan ya tiempo funcionando—, el futuro apunta a una integración mucho mayor del automóvil en la sociedad. Una vez que el vehículo está preparado para transmitir y recibir información por señales radioeléctricas, se le ofrece una extensa gama de productos y servicios.

Frente a una competencia que se prevé dura, con pequeños márgenes en productos cada vez más asimilables a objetos de consumo básico, los fabricantes están invirtiendo enormes sumas en la creación de una infraestructura telemática. Los suministradores de equipos telemáticos trabajan también intensamente para que tal concepción tenga éxito.

Pero al mismo tiempo quedan por resolver una serie de cuestiones que atañen a seguridad, normas legales, derecho a la intimidad y responsabilidades exigibles. Quizá no sea eso forzosamente negativo. La industria telemática dispone ahora de una oportunidad óptima para conseguir de los gobiernos que la necesidad de preservar la seguridad, la intimidad y otros valores no haga prescindir de los beneficios económicos y sociales que puede ofrecer la telemática. Todavía hay tiempo para establecer la normalización de los sistemas telemáticos.

Se comenta en el sector que están naciendo tres submercados telemáticos distintos. El primero de ellos, dirigido al "asiento delantero", se centra en la seguridad, protección y utilidad que facilitan la conducción proporcionando una asistencia a medida de las necesidades. Ejemplo de este tipo de servicio es la información del tráfico personalizada: cuando el conductor ve que se aproxima un embotellamiento, el sistema telemático puede ofrecerle rutas alternativas abiertas. Por razones de seguridad, todavía no está claro en qué grado podrían acceder los ocupantes de asientos delanteros a otros servicios llamados de productividad, como son los de banco electrónico, cotizaciones de bolsa y correo electrónico audible.

El segundo submercado se orienta al "asiento trasero" y consistirá sobre todo en entretenimientos, juegos interactivos a la carta, música digital, películas, etcétera. Tales servicios darán acceso a productos que, por ejemplo, distraigan a los chicos durante los viajes largos.

El tercer mercado se dirige al motor y otras aplicaciones mecánicas, utilizando los datos recogidos por ordenadores de a bordo para proporcionar un diagnóstico a distancia, las revisiones de la informática y los pedidos "inteligentes" de piezas de repuesto. De este modo, los fabricantes o vendedores de automóviles podrán avisar al conductor cuando el motor le funcione mal, y hasta ponerlo a punto mientras el vehículo está aparcado por la noche.

SERVICIOS TELEMATICOS

SERVICIOS	TIPO DE PAGO	TECNICAS BASICAS
SERVICIOS		
Ayuda en carretera	Abono	GPS
Rastreo de vehículos	Abono	GPS
Apertura de puertas a distancia	Abono	GPS
Llamada por accionamiento de la almohadilla de aire protectora	Abono	GPS
ENTRETENIMIENTO		
Videojuegos	Pago por uso	Vídeo digital
Reproducción de DVD		Vídeo digital
Radio por satélite	Abono	Radio por satélite
Descarga de música y películas	Pago por uso	Inalámbrico de banda ancha
Radio por Internet	Abono	Inalámbrico de banda ancha
NAVEGACION		
Direcciones detalladas giro a giro	Abono	GPS, datos inalámbricos, voz*
Información turismo/recreativa	Soporte publicitario	Datos inalámbricos
Noticias, bolsa, clima	Abono, soporte publicit.	Datos inalámbricos, voz*
Billetes, reservas	Soporte publicitario	Datos inalámbricos, voz*
Agenda, libreta de direcciones	Abono, soporte publicit.	Datos inalámbricos
Tráfico en tiempo real, desvíos	Abono, pago por uso	GPS, datos inalámbricos
Publicidad localizada	Soporte publicitario	GPS, datos inalámbricos

Fuente: Forrester Research, Inc.

*Reconocimiento de voz y conversión texto a voz

Conducción segura

Pese a todas las posibilidades de la técnica, queda por determinar cómo afecta su utilización a la seguridad y a otros factores. El debate actual sobre el empleo de teléfonos celulares móviles en los coches subraya el carácter crítico de las interfaces telemáticas hombre-máquina y el modo de utilizarlas los conductores. Por multitud de razones los usuarios cargan en sus vehículos toda una serie de dispositivos portátiles para usar mientras conducen: teléfonos celulares, ordenadores de bolsillo, adjuntos digitales personales. Puesto que se pasa gran parte del tiempo en desplazamientos, existe un apremio creciente por aumentar la productividad a través de tales artilugios.

Ante eso, opina Paul Green, del Instituto de Investigación de Transportes de la Universidad de Michigan: "Despierta un gran interés la posibilidad de que estos sistemas enriquezcan la experiencia de la conducción. Sin embargo, se ha insistido relativamente poco sobre

los posibles riesgos de sobrecarga del conductor que entraña su utilización. Si no se toman medidas, habrá un número apreciable de muertos y heridos imputable al uso de los sistemas de información”.

El punto clave todavía sin resolver es cómo evitar que el conductor se distraiga indebidamente de su misión primordial —la conducción— mientras contesta a mensajes de correo electrónico o busca un restaurante. En la mayoría de las circunstancias la demanda cognitiva del proceso de conducción es muy moderada. Por eso todos nosotros hacemos mientras conducimos otras tareas que no guardan relación alguna con la guía del vehículo.

La distracción del conductor

Pero, ¿cuándo se llega al límite? “Por desgracia, tenemos muy pocos datos sobre distracciones de conductores, lo que nos impide determinar la magnitud real del problema”, señala Michael Goodman, de la Administración Nacional de Seguridad del Tráfico en Autopistas (siglas en inglés NHTSA) en Washington, D.C. “Creemos que al menos un 25 por ciento de los accidentes mortales están relacionados con la distracción. Otros investigadores sostienen que ese número oscila entre el 30 y el 50 por ciento. En todo caso, estos accidentes están muy escasamente documentados, porque no se puede preguntar al conductor fallecido y los sobrevivientes no desean describir las causas por temor a su posible culpabilidad. Lo que sí sabemos es que casi todas las actividades en el interior de los coches —comer, ajustar el espejo, cambiar de estación de radio— están asociadas a colisiones. Y cuando esa acción coincide con un suceso fortuito como la irrupción de un perro o la aparición repentina de una curva peligrosa, el accidente es inevitable.”

La técnica utilizada en los teléfonos celulares sirve de modelo para introducir la telemática en los automóviles. Como sucede con el teléfono celular, el dispositivo telemático mantiene al conductor en contacto con el resto del mundo. Análogamente, siempre existe la posibilidad de que la telemática induzca sobrecarga en el conductor. Pese a la continua controversia sobre el uso de teléfonos móviles celulares mientras se conduce y las recientes prohibiciones impuestas, la investigación sobre la repercusión en la seguridad del uso de aparatos electrónicos dentro del vehículo todavía arroja resultados relativamente pobres. Aun con las manos libres los teléfonos celulares activados por voz producen suficiente distracción cognitiva para que el conductor cometa errores.



2. ESTACION ACOPLADA para adjunto digital personal y teléfono celular.

Se cuentan por centenares de millones los teléfonos celulares existentes en el mundo occidental. Del 70 al 80 por ciento de estos teléfonos son utilizados en los vehículos de sus propietarios. Al mismo tiempo, los teléfonos se están abaratando y su manejo es más fácil, lo que contribuye a incrementar su empleo. Al haber un mayor número de usuarios que hacen más llamadas, la posibilidad de distracción y, en paralelo, el riesgo de accidentes aumentan.

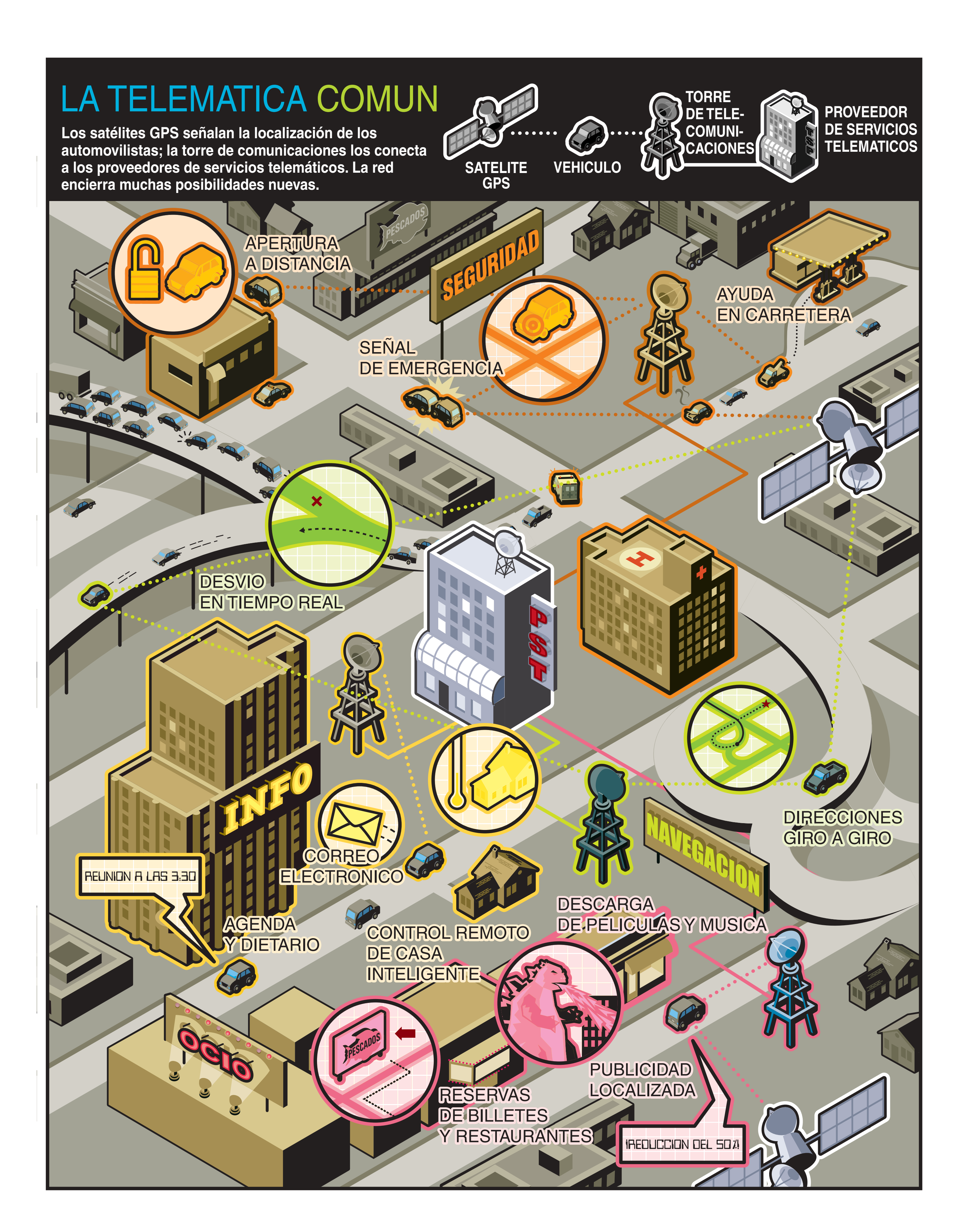
Interesa señalar que no es lo mismo conversar a través de un teléfono de manos libres que charlar con un pasajero. El interlocutor distante no está presenciando la conducción, mientras que el pasajero, tan preocupado por la seguridad como el mismo conductor, tiende a callarse cuando la conducción reclama especial atención. Según un estudio realizado por la Universidad de Utah y publicado por el Consejo Nacional de Seguridad (NSC), conversar por teléfono mientras se conduce puede causar una considerable merma de facultades del conductor, tanto si el teléfono ha de tomarse en la mano como si es de manos libres. La investigación sostiene que el uso del teléfono celular en viajes por carretera crea unos niveles de distracción del conductor muy superiores a la escucha de radio o la audición de grabaciones.

De acuerdo con esa investigación, las medidas legales prohibiendo el uso de aparatos de mano en vehículos y autorizando el de aparatos de manos libres probablemente no van a reducir gran cosa las distracciones de los conductores por conversaciones telefónicas. “Se necesita investigar mucho más sobre esta materia —señala Alan McMillan, presidente de NSC— para que podamos comprender plenamente los efectos sobre las costumbres públicas del creciente empleo de teléfonos celulares y otros dispositivos electrónicos (GPS, fax, ordenador) en los vehículos en movimiento.”

En razón a su capacidad de distracción fatal para el conductor, el uso de teléfonos celulares y otras técnicas inalámbricas dentro de los vehículos a motor se restringe o prohíbe actualmente en más de una docena de países: Alemania, Australia, Brasil, Chile, España, Filipinas, Israel, Italia, Japón, Portugal, Reino Unido, Singapur, Sudáfrica y Suiza. Las directrices de diseño de la Comisión Europea en 1999 establecen: “La información y las comunicaciones destinadas al uso del conductor mientras conduce no deben distraer,



3. PANTALLAS DE VIDEO para los pasajeros de atrás.



LA TELEMATICA COMUN
Los satélites GPS señalan la localización de los automovilistas; la torre de comunicaciones los conecta a los proveedores de servicios telemáticos. La red encierra muchas posibilidades nuevas.
SATELITE GPS
VEHICULO
TORRE DE TELE-COMUNI-CACIONES
PROVEEDOR DE SERVICIOS TELEMATICOS
PESCADOS
SEGURIDAD
APERTURA A DISTANCIA
AYUDA EN CARRETERA
SEÑAL DE EMERGENCIA
DESVIO EN TIEMPO REAL
PST
INFO
CORREO ELECTRONICO
REUNION A LAS 3:30
AGENDA Y DIETARIO
CONTROL REMOTO DE CASA INTELIGENTE
NAVEGACION
DIRECCIONES GIRO A GIRO
DESCARGA DE PELICULAS Y MUSICA
OCIO
RESERVAS DE BILLETES Y RESTAURANTES
PUBLICIDAD LOCALIZADA
¡REDUCCION DEL 50%!

molestar ni sobrecargar al mismo”. Actualmente en los EE.UU. no existe ninguna directriz industrial aceptada ni norma de rango nacional aplicable a los dispositivos telemáticos dentro de vehículos.

Para precaverse contra el vacío legal y evitar litigios por responsabilidad del producto, los fabricantes se están centrando en técnicas importantes, aunque todavía poco maduras y también susceptibles de crear problemas, como son las de reconocimiento de voz y activación por voz y la visualización sin bajar la cabeza. Tales equipos permitirán a los conductores hacer uso de la técnica inalámbrica sin apartar los ojos de la carretera ni las manos del volante. Pero, ¿cómo garantizar que su mente siga centrada en la tarea de conducir? ¿Cuál es el grado de interacción o distracción cognitiva que puede tolerar un conductor sin perder la atención al camino que recorre?

La distracción cognitiva es uno de los cuatro tipos de distracción que pueden afectar a un conductor: las otras son de índole visual, auditiva y biomecánica. Pero la distracción cognitiva, que puede sobrevenir al reflexionar sobre asuntos personales o profesionales, al recordar instrucciones verbales o incluso al escuchar una voz sintetizada, es mucho más esquiva y difícil de medir que las de los demás tipos. Lo que sí se sabe es que disminuye la consciencia del sujeto frente a incidencias de la conducción.

Surge ahora la cuestión de cómo y cuándo se ha de dar información al conductor. En la investigación al respecto acometida por NHTSA se utilizará sobre todo el nuevo simulador nacional avanzado de conducción, un sistema de alta fidelidad que ahora empieza a funcionar en la ciudad de Iowa. Este sistema creará una réplica de la conducción en autopista con la seguridad y el control propios de un laboratorio. Los fabricantes de automoción investigan también por su cuenta. Ford, por ejemplo, ha construido un simulador llamado VIRTTEX (VIRtual Test Track EXperiment) con el fin de estudiar los aspectos relativos a la carga de trabajo y la distracción del conductor por el uso de dispositivos electrónicos en el coche.

Gestión de la carga de trabajo del conductor

Entretanto, General Motors está montando un laboratorio de evaluación del trabajo de conducción para analizar cómo se comportan dispositivos telemáticos concretos sobre una pista de pruebas. En esa línea ha decidido inhabilitar, mientras el vehículo circula, la entrada en la que se consulta a sistemas de navegación la ruta hacia un determinado destino.

En NHTSA se espera que el problema mejore parcialmente mediante una serie de “gestores de trabajo” cada vez más refinados. Estos gestores, actualmente en desarrollo en varias empresas de automoción, regularán el flujo de información que recibe el conductor observando las exigencias de la conducción en cada momento. Con tráfico intenso, por ejemplo, una llamada entrante podría desviarse a un contestador. Si se llegara a comprender enteramente cómo son las interacciones del conductor con su vehículo y el entorno, podría idearse un algoritmo más elaborado que activara y desactivara los sistemas telemáticos.

Quizá se asista pronto al nacimiento de un gestor de diálogo. Según se prevé, al principio funcionará captando y analizando los datos disponibles del vehículo: posición del acelerador, posición del freno, orientación del volante. Después se añadirían sensores capaces de observar las condiciones del entorno, con lo que el gestor de diálogo podrá ser más eficaz. Tales sensores, muchos de ellos ya existentes pero todavía no instalados en vehículos, podrían observar las condiciones de visión (luz, oscuridad, niebla), el estado del piso de la carretera (húmedo, seco, helado), el flujo y la densidad del tráfico que registren los sistemas de radar o los de control de velocidad de crucero y prevención de choques por infrarrojos. Después podría venir el desarrollo de un sistema observador de la posición de la cabeza semejante al que emplean los pilotos de helicópteros militares: siguiendo los movimientos de su cabeza se determinaría si el conductor está atento o no. En caso de detectarse una emergencia mientras el conductor no mira la carretera, se le enviaría una señal de alarma.

Mientras los temas de seguridad e intimidad no se aborden de una manera integrada, seguirá siendo responsabilidad de los conductores mantener la mente concentrada en la conducción pese a las inevitables distracciones originadas por los servicios telemáticos.



4. VIDEOJUEGOS en los asientos traseros para mantener ocupados a los niños.

EMPRESAS DE TELEMATICA

SERVICIOS TELEMATICOS
Assist, BMW *Munich, Alemania*
ATX Technologies *Dallas*
OnStar *Troy, Michigan*
TeleAid, Mercedes-Benz *Stuttgart, Alemania*
Wingcast, Ford/Qualcomm *San Diego*

EQUIPOS TELEMATICOS
Robert Bosch *Stuttgart, Alemania*
Delphi Automotive Systems *Troy, Michigan*
IBM *White Plains, Nueva York*
Johnson Controls *Plymouth, Michigan*
Microsoft *Redmond, Washington*
Motorola *Schaumberg, Illinois*
Philips Electronics *Eindhoven, Países Bajos*
Siemens Automotive *Ratisbona, Alemania*
Sun Microsystems *Palo Alto, California*
Visteon Dearborn, *Michigan*

SISTEMAS DE NAVEGACION
ComROAD *Unterschleissheim, Alemania*
Webraska *Poissy, Francia*

INFORMACION SOBRE EL TRAFICO
Mobility Technologies *Wayne, Pa.*
Westwood One *New York City*

Hielo y origen de la vida

El hielo que conocemos en la Tierra es un elemento hostil para la prosperidad de la vida. Pero existe en el espacio una forma exótica del mismo que fomenta la creación de moléculas orgánicas. Quizá sembró las semillas de la vida en nuestro planeta

David F. Blake y Peter Jenniskens

Cuando la sonda *Voyager 1* se alejaba del sistema solar, hace 11 años, los ingenieros de la NASA giraron la cámara del satélite para que tomara una fotografía parcial de la Tierra. El planeta aparecía reducido a un solo píxel azulado; debía el color al reflejo de la luz solar sobre sus vastos océanos. La Tierra es un planeta con agua. En cualquier punto del globo, próximo o cercano, elevado o profundo, doquiera haya agua líquida, los investigadores se encontrarán con alguna forma de vida que es capaz de desenvolverse en su seno.

Ello no obstante, la naturaleza del agua presenta una cruel dicotomía. El agua líquida acuna la vida, mientras que el agua en su forma de cristal sólido la destruye. Los organismos pueden refugiarse en los géiseres, sumergirse en aguas muy saladas y deglutir ácido, pero todos rehúyen el hielo. La rígida ordenación de las moléculas de agua en los cristales de hielo expulsa las impurezas y rompe las células orgánicas sin posibilidad de recuperación. Tal es la naturaleza del hielo en la Tierra. Pese a ello, los descubrimientos recientes de cierto tipo insólito de agua helada, inexistente en la Tierra y abundante en el espacio exterior, han provocado que los investigadores revisen sus teorías sobre el hielo. En su forma interestelar, el hielo de agua (a diferencia de los hielos de dióxido de carbono y otros compuestos) puede alojar la clase de compuestos orgánicos simples de los que la vida surgió; podría incluso haber desencadenado su formación. En consecuencia, el hielo interestelar pudo haber desempeñado un papel determinante en el origen de la vida.

El conocimiento de la fuente de los materiales orgánicos que tal vez fueran los precursores de la vida ha constituido, desde hace mucho tiempo, uno de los retos más apasionantes y fecundos de la investigación sobre los orígenes. Desde hace más de un decenio, se conoce la presencia de compuestos orgánicos en las nubes interestelares y en los cometas. Se ha conjeturado incluso que hay una escarcha rica en agua helada en todos los lugares del espacio donde el polvo y el gas se hallan a una temperatura lo suficientemente baja para condensarse en sólidos, sobre todo en las nubes moleculares frías [*véase* “Materias primas de la vida”, por Max P. Bernstein, Scott A. Sandford y Louis J. Allamandola; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 1999].

Muchos expertos en planetología han ido más lejos. Proponen que los materiales orgánicos encerrados en los hielos viajaron hasta la Tierra. Cuando la contracción de una nube molecular fría formó nuestro sistema solar hace 4500 millones de años, tal y como dice la teoría, algunos hielos de la nube pudieron agruparse en cometas. Estas bolas de hielo y rocas pudieron entonces haber traído los compuestos orgánicos a la joven Tierra en sus colisiones con ella. Una vez en nuestro planeta, los materiales orgáni-

cos intervendrían en las reacciones químicas de las cuales surgieron los primeros organismos.

De semejante cuadro partía la hipótesis que explicaba la arribada de los compuestos orgánicos a la Tierra. Pero hasta hace poco nadie sabía cómo se formaron primero ellos en el espacio interestelar. El estudio exhaustivo del comportamiento del agua a temperaturas próximas al cero absoluto (cuando cesa todo movimiento molecular) ha revelado que bastaron unos pequeños cambios en la estructura del hielo para desencadenar las primeras asociaciones de carbono, nitrógeno y otros elementos cruciales para la biología.

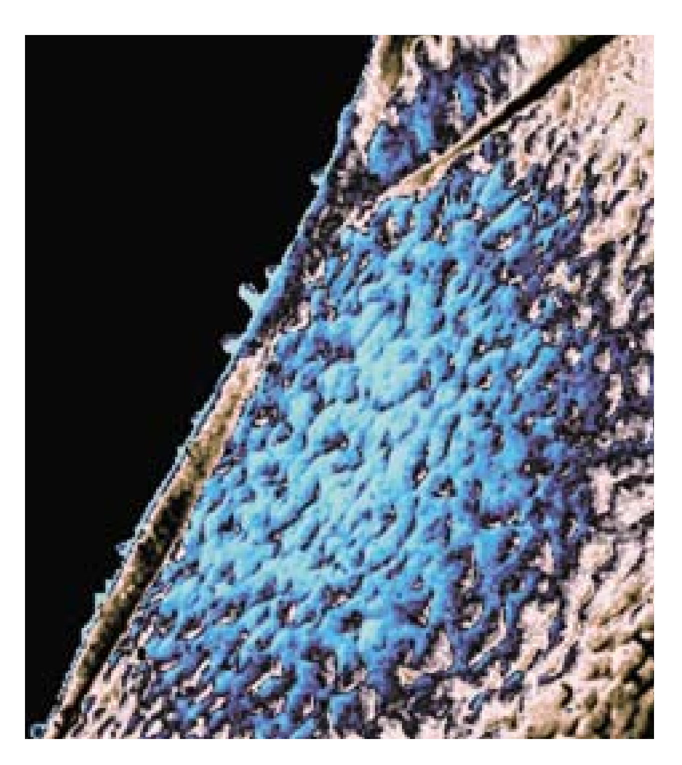
En el espacio exterior

Nuestro equipo del Centro de Investigación Ames de la NASA estudia las misteriosas y sorprendentes propiedades del hielo interestelar. Allí se confirmó que se trataba de un hielo carente de estructura cristalina. Es, pues, amorfo. No tiene ningún orden molecular o atómico apreciable, ni tampoco presenta superficies de cristal; para cualquier viajero interestelar, ofrece la transparencia del vidrio de una ventana.

En la naturaleza la mayoría de los sólidos se dan en forma cristalina, con sus moléculas agrupadas en una estructura ordenada. Sin embargo, cuando sometemos algunos líquidos a un brusco enfriamiento, se elimina la transición por el estado cristalino y el líquido se solidifica amorfamente. De ese proceso contamos con un ejemplo harto conocido en la fabricación del vidrio, una forma amorfa del silicio. Aunque el enfriado rápido permite manufacturar silicio amorfo, no opera igual con el agua líquida. Las gotas de agua tienden siempre a cristalizarse. Por ese motivo tardó en descubrirse el hielo amorfo hasta 1935, cuando se empezó a investigar el comportamiento del vapor de agua depositado lentamente en un vacío.

El hallazgo revistió enorme interés para los astrónomos, quienes sabían ya que el agua se comportaba en el espacio exterior de un modo distinto que en la Tierra. Suele decirse que una molécula de agua consta de un átomo de oxígeno químicamente unido a dos átomos de hidrógeno. Pero lo que hace que el agua sea una sustancia tan versátil es que el átomo de oxígeno tiene dos cargas negativas: un par de electrones que pueden formar enlaces débiles con los átomos de hidrógeno, dotados de carga positiva, de otras moléculas de agua próximas. A temperaturas inferiores al punto de congelación, las moléculas de agua adoptan sus configuraciones más estables, intensificando por tanto sus enlaces de hidrógeno; el hielo resultante se organiza limpiamente con cientos de moléculas.

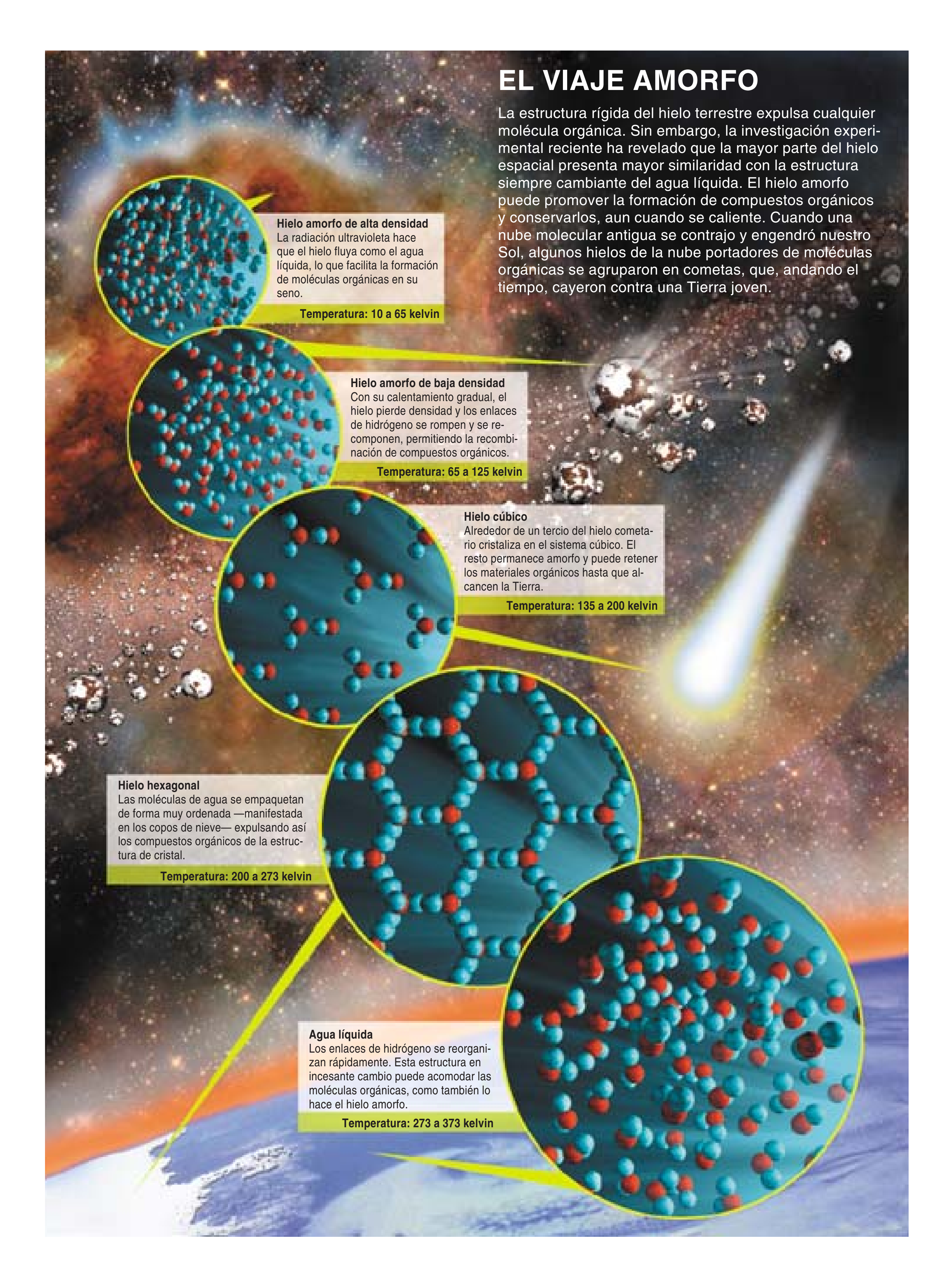
El modelo particular de empaquetamiento que se origine cuando el agua se congele dependerá de la presión. Pueden existir hasta 12 fases de hielo cristalino, pero sólo uno —el hielo hexagonal— ocurre de forma natural en la Tierra. Los átomos de oxígeno adoptan un modelo séxtuplo, que podemos observar en los copos de nieve. A temperaturas muy por debajo del punto de congelación, los átomos de oxígeno se empaquetan de acuerdo con el sistema cúbico o, como en el caso del hielo amorfo, carentes de orden apreciable alguno.



2. SE FORMO UNA CAPA MICROSCOPICA de hielo amorfo y cúbico (*color azul*) cuando los investigadores calentaron una película de hielo de escasos centenares de moléculas hasta unos 183 kelvin dentro de un microscopio criogénico.

Gran parte de la red de enlaces que caracteriza al hielo cristalino se une también a las moléculas de agua líquida. La diferencia esencial —decisiva para la vida— estriba en la redistribución rápida e incesante de los enlaces de hidrógeno en el agua líquida. Por eso mismo, el agua líquida puede ajustar su estructura para acomodarla a los requerimientos físicos y químicos de los seres vivos. Así como una burbuja de aire puede desplazarse a través del agua y no a través del hielo, debe permitirse que las moléculas orgánicas se muevan entre las moléculas de agua si han de recombinarse para formar compuestos más complejos.

Quizá la propiedad más atractiva del hielo amorfo interestelar sea la de que, expuesto a la radiación del espacio profundo, puede fluir aun cuando su temperatura apenas supere pocos grados por encima del cero absoluto (equivalente a –273 grados Celsius). Sin duda, la similitud de este hielo con el agua líquida lo hace ser partícipe de la creación de los compuestos orgánicos. Se comenzó a sospechar estas propiedades a principios de los años setenta, cuando empezó a abordarse la química del hielo en el corazón de nubes moleculares frías del espacio interestelar. Los experimentos pioneros de J. Mayo Greenberg, de la Universidad de Leiden, y de Louis


EL VIAJE AMORFO
La estructura rígida del hielo terrestre expulsa cualquier molécula orgánica. Sin embargo, la investigación experimental reciente ha revelado que la mayor parte del hielo espacial presenta mayor similaridad con la estructura siempre cambiante del agua líquida. El hielo amorfo puede promover la formación de compuestos orgánicos y conservarlos, aun cuando se caliente. Cuando una nube molecular antigua se contrajo y engendró nuestro Sol, algunos hielos de la nube portadores de moléculas orgánicas se agruparon en cometas, que, andando el tiempo, cayeron contra una Tierra joven.
Hielo amorfo de alta densidad
La radiación ultravioleta hace que el hielo fluya como el agua líquida, lo que facilita la formación de moléculas orgánicas en su seno.
Temperatura: 10 a 65 kelvin
Hielo amorfo de baja densidad
Con su calentamiento gradual, el hielo pierde densidad y los enlaces de hidrógeno se rompen y se recomponen, permitiendo la recombinación de compuestos orgánicos.
Temperatura: 65 a 125 kelvin
Hielo cúbico
Alrededor de un tercio del hielo cometario cristaliza en el sistema cúbico. El resto permanece amorfo y puede retener los materiales orgánicos hasta que alcancen la Tierra.
Temperatura: 135 a 200 kelvin
Hielo hexagonal
Las moléculas de agua se empaquetan de forma muy ordenada —manifestada en los copos de nieve— expulsando así los compuestos orgánicos de la estructura de cristal.
Temperatura: 200 a 273 kelvin
Agua líquida
Los enlaces de hidrógeno se reorganizan rápidamente. Esta estructura en incesante cambio puede acomodar las moléculas orgánicas, como también lo hace el hielo amorfo.
Temperatura: 273 a 373 kelvin

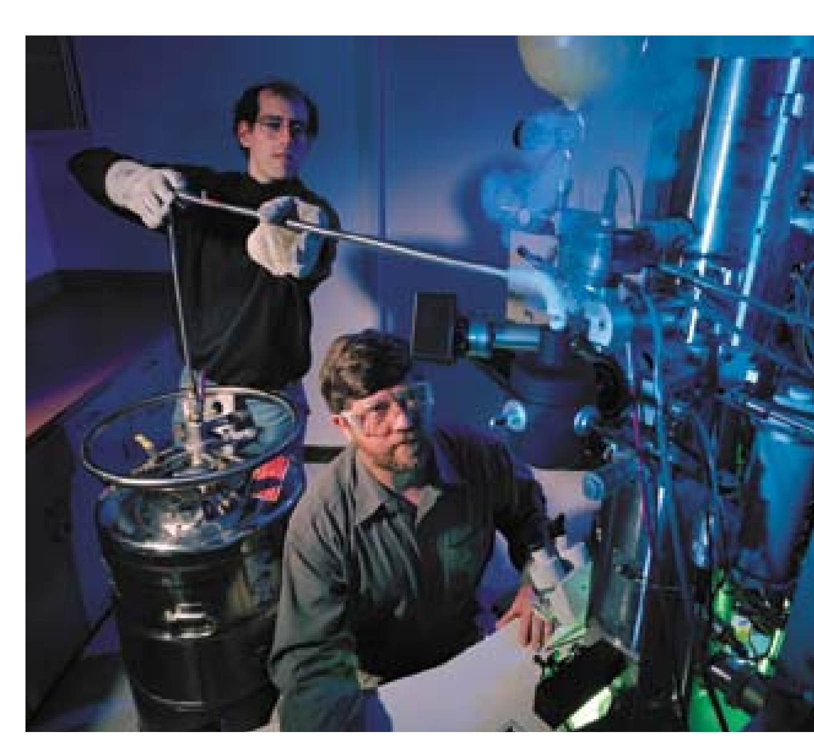
J. Allamandola, del Centro de Investigación Ames, demostraron que hasta un 10 por ciento del volumen de los granos de hielo interestelar se hallaba constituido por moléculas simples: dióxido de carbono, monóxido de carbono, metanol y amoníaco.

Desde entonces, los telescopios especializados que pueden observar radiación infrarroja y submilimétrica —capaces de penetrar en grandes cantidades de polvo y gas, mayores que con la radiación visible— han permitido a los astrónomos detectar más de 100 especies distintas de compuestos orgánicos en las nubes moleculares frías. Al comparar los espectros infrarrojos de las nubes en el espacio con mediciones similares de hielo amorfo en los laboratorios, brotó la sospecha de que muchos de los compuestos orgánicos nacidos en los granos de hielo interestelar se congelan en núcleos de silicatos o carbono. En las nubes moleculares densas, estos núcleos de polvo no superan la milésima parte de un milímetro.

A pesar de estas observaciones complicadas, seguía ignorándose por qué persistían las moléculas orgánicas en el interior del hielo y de qué modo reaccionaban allí. La importancia de las propiedades materiales del hielo para la síntesis orgánica se vislumbró en 1993, cuando en el laboratorio de microscopía de Ames comenzamos a estudiar la estructura del hielo a baja presión. Obtuvimos películas de hielo con un espesor de apenas unos pocos cientos de moléculas al congelar vapor de agua dentro de un microscopio electrónico de transmisión criogénico, preparado al efecto (*véase la figura 3*). Para seguir los cambios en la forma y estructura del hielo, grabamos imágenes de gran ampliación y modelos de difracción electrónica conforme el hielo iba calentándose o enfriándose.

Cuando la temperatura dentro de nuestro microscopio criogénico bajaba (a menos de 30 kelvin) y las moléculas de agua se depositaban con suma parsimonia (menos de 100 micras la hora), creábamos sólidos amorfos muy similares a las estructuras del hielo interestelar según se interpreta de sus espectros infrarrojos. Nuestros experimentos mostraron que el hielo en cuestión era de una altísima densidad, un tipo conocido hasta entonces sólo por un experimento sin confirmar de difracción de rayos X llevado a cabo en 1976. También determinamos que el vapor de agua depositado a 14 grados por encima del cero absoluto presentaba una estructura amorfa diferente de la creada a una mayor temperatura de 77 kelvin. Logramos observar la transición de la forma de baja temperatura a la forma de mayor temperatura a medida que calentábamos el hielo. Podíamos ofrecer una explicación más coherente de los patrones de difracción de la forma de baja temperatura si suponíamos que algunas de las moléculas de agua se congelaban dentro de las cavidades creadas por las moléculas vecinas. Este sobreempaquetamiento de los átomos de oxígeno producía un hielo amorfo con una densidad de 1,1 gramos por centímetro cúbico, un 15 por ciento más denso que el hielo común.

Confirmamos, asimismo, los resultados obtenidos en 1984 por H. G. Heide, del Instituto Fritz Haber



3. EL HELIO LIQUIDO se escapa de un microscopio criogénico electrónico, proyectado al efecto, conforme los autores, Peter Jenniskens (*izquierda*) y David F. Blake, preparan una muestra de hielo amorfo.

de la Sociedad Max Planck en Berlín, tras bombardear hielo amorfo de alta densidad con electrones de gran energía. Cuando se llevó a cabo este experimento a temperaturas inferiores a los 30 kelvin, el hielo se reestructuró rápidamente; de hecho, se tornó fluido. Constituyó una sorpresa absoluta ver que el hielo amorfo se parecía al agua líquida más que a una estructura cristalina. Se venía creyendo hasta entonces que todas las formas de agua helada, enfriadas a unas pocas decenas de kelvins, permanecerían por siempre inalteradas. Heide observó que, con independencia de su estructura inicial, el hielo se transformaba en hielo amorfo muy denso, una vez irradiado. Desde esa fecha, otros investigadores han descubierto que los fotones ultravioletas, habituales irradiadores en las nubes moleculares, alteran de un modo similar la estructura del hielo.

A partir de lo experimentado en Ames, propusimos que esta radiación convertía la mayor parte del hielo interestelar en el tipo amorfo de alta densidad. Comprendemos ahora que las moléculas de agua sobreempaquetadas en ese hielo, así como los defectos que existen en dicho proceso de agregación, facilitan la movilidad molecular dentro de la estructura amorfa. Resultado de ello, en el hielo interestelar comenzaron por primera vez a combinarse los elementos de interés biológico (oxígeno, carbono y nitrógeno) para producir compuestos orgánicos. La investigación revela que, al bombardear el hielo amorfo de alta densidad con partículas muy energéticas o con fotones, se rompen el monóxido de carbono, el

Los autores

DAVID F. BLAKE y PETER JENNISKENS vienen trabajando juntos en el Centro de Investigación Ames de la NASA desde 1993, año en que Jenniskens recibió una subvención para estudiar las formas atípicas del hielo en el laboratorio de microscopía aplicada a las ciencias espaciales que Blake estableciera allí en 1990. Blake dirige también la sección de exobiología de Ames. Jenniskens estuvo al frente de la primera misión de astrobiología de la NASA que exploró el impacto de materia cometaria contra la Tierra durante la reciente lluvia de meteoros de las Leónidas.

amoníaco y otras impurezas en radicales, que emigran por el interior del hielo hasta que se combinan con otras especies reactivas.

Una vez habíamos establecido un mecanismo razonable para explicar el origen de los compuestos orgánicos dentro del hielo interestelar, abordamos luego la conservación de dichas sustancias durante el tiempo y a la distancia necesaria para alcanzar la Tierra. Los mejores candidatos para cumplir esa tarea son los cometas, reliquias de los planetesimales de hielo que se agruparon durante el proceso de contracción gravitatoria de la nube molecular que dio origen a nuestro sistema solar. En el curso del proceso se registraban cerca del protosol altas temperaturas, que convertían los elementos y los compuestos más resistentes al calor en gas. Pero en las regiones más frías de la nebulosa solar, más allá de la órbita de Júpiter, el hielo amorfo y los compuestos orgánicos que se habían formado allí se preservaron en forma de polvo, congregado en cometas y otros planetesimales.

Ligados a la Tierra

Del estudio de las colas de los cometas a su paso por el sistema solar interior se ha llegado a la conclusión de que la mayor parte del hielo que portan esos cuerpos debe hallarse aún en su forma amorfa. En su aproximación al Sol, los cometas van liberando monóxido de carbono y metano, generando así la cola. Pero esa liberación ocurre a temperaturas bastante más altas de lo que se esperaría si los compuestos se hubieran solidificado en depósitos distintos de los del hielo. (Si tales compuestos volátiles se congelaran por separado, los cometas los liberarían a temperaturas más bajas, bastante antes de entrar en el interior del sistema solar.) Por tanto, los gases deben haber quedado atrapados dentro de la estructura del hielo; pero, ¿cómo?

Durante la formación de los cometas, el hielo se calienta; no resulta, pues, verosímil que mantenga su estructura amorfa de alta densidad. Antes bien, ese suave calentamiento transforma la estructura en la forma amorfa de baja densidad. De acuerdo con nuestro experimento criogénico, semejante transición procede gradualmente entre los 35 y los 65 kelvin. Los enlaces de hidrógeno se rompen y se restablecen en el curso del proceso, permitiendo el movimiento y la recombinación química de fragmentos moleculares dentro del hielo. Cuando el hielo se calienta lo suficiente como para cristalizar, las moléculas volátiles dejan la estructura del agua y salen expulsadas al espacio.

Al estudiar la dependencia de la cristalización con respecto al tiempo y la temperatura, observamos que la primera fase de verdadera cristalización comienza alrededor de los 135 kelvin; induce a las moléculas de agua a empaquetarse en un sistema cúbico. Las moléculas orgánicas no sobrevivirían en el hielo cúbico; pero descubrimos también que permanecía otro componente amorfo aun cuando se calentara el hielo. Sólo cristaliza un tercio del volumen total de hielo, más o menos; el balance sigue siendo el de una estructura desordenada que apenas difiere de las variedades amorfas de alta y baja densidad.

Antes de que empezaran nuestros experimentos, se sabía ya que el hielo amorfo se convertía en un líquido viscoso entre los 125 y 136 kelvin. Dentro de esa horquilla, se opera un cambio brusco en la velocidad de calentamiento del hielo, fenómeno bien conocido a través del estudio de otros materiales amorfos como el vidrio de las ventanas. Por debajo de ese intervalo crítico de temperaturas, llamado la transición del vidrio, el material opone resistencia a la deformación y se comporta como un sólido; por encima de ese intervalo, puede moldearse y conformarse. No obstante, la viscosidad del líquido por encima mismo de la temperatura de transición del vidrio guarda mayor parecido con la de la melaza que con la del agua líquida común. Cualquier desplazamiento dentro de ese estado viscoso requeriría 100.000 años. Una cantidad de tiempo, pese a todo, irrelevante en la vida de un cometa.

También antes de nuestro descubrimiento, suponíase que esa forma insólita de agua líquida constituía una rareza en el espacio. Los investigadores admitían, en su mayoría, que el agua a esas temperaturas adquiriría rápidamente la estructura de hielo cúbico, pero nosotros encontramos que, entre los 150 y los 200 kelvin, el líquido viscoso coexistía indefinidamente con hielo cúbico. Por tanto, el líquido en cuestión constituye un componente, de potencial interés, de las superficies de los comentas y de las lunas heladas de los planetas vecinos, todos los cuales se encuentran dentro de este rango de temperaturas. En cuanto a los

Resumen / Enlaces cambiantes

- El agua se presenta en diversas formas, de acuerdo con los enlaces especiales que las moléculas de H_2O establecen con sus moléculas vecinas.
- Los enlaces de hidrógeno permanecen rígidos en el hielo cristalino que se da en la Tierra, pero tienden a reordenarse cuando se hallan expuestos a la radiación ultravioleta típica del espacio profundo.
- A la rotura de los enlaces de hidrógeno se debe que el hielo amorfo del espacio guarde un mayor parecido con el agua líquida que con el agua helada de los copos de nieve o de los cubitos de hielo.

cometas, la mezcla de líquido viscoso con hielo cristalino podría atrapar a las moléculas de gas subyacentes bajo la superficie, ayudando a conservar, en el curso del tiempo, los compuestos orgánicos clave, quizás hasta que el cometa alcanzara la órbita de la Tierra.

Y esto nos devuelve hacia la forma más familiar de agua helada que hay en la Tierra. El calentamiento ulterior hasta los 200 kelvin (–73 grados Celsius) de la mezcla de agua líquida viscosa con hielo cristalizado en el sistema cúbico hará que el hielo se reestructure por entero en un sistema hexagonal, peculiar de la Tierra. Durante el proceso de recristalización, se expulsan del sólido todas las impurezas remanentes, incluidos los compuestos orgánicos. Desde este momento, el hielo se parece al que conocemos en copos de nieve, glaciares y cubitos de la nevera. Mas, para nuestra fortuna, los materiales orgánicos disponen ahora de un lugar nuevo donde refugiarse: el agua líquida de nuestros cuatro puntos cardinales.

El agua, así parece, ha estado presente en todas y cada una de las etapas de creación y desarrollo de las moléculas necesarias para la vida. Ha recorrido un largo camino desde sus orígenes, escarcha sobre los granos de polvo interestelar, hasta su último destino, agua líquida en la Tierra, y también en otros lugares habitables del universo. Esas formas exóticas de hielo cuyas propiedades físicas y químicas apenas hemos comenzado a descifrar, podrían aportar a la interpretación de la historia del universo mucho más de lo que jamás se había sospechado.

Bibliografía complementaria

SOLAR SYSTEM ICES. B. Schmitt, C. DeBergh y M. Festou. Kluwer Academic Publishers, 1998.

ORGANIC MOLECULES IN THE INTERSTELLAR MEDIUM, COMETS AND METEORITES: A VOYAGE FROM DARK CLOUDS TO THE EARLY EARTH. P. Ehrenfreund y S. Charnley en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 38, páginas 427-483; 2000.

E

C B

D L F

P T E O

Degeneración macular

Poco a poco vamos conociendo las causas de este devastador daño ocular que se presenta en la vejez

Hui Sun y Jeremy Nathans

Si observamos con atención los ojos de alguien que esté leyendo un libro, veremos que van de un extremo a otro de cada línea. Así se mueven los nuestros mientras leemos este artículo. Para comprender cuán importante resulta tal movimiento ocular, tratemos de leer esta frase a una distancia normal, mientras fijamos la mirada en una palabra. Podremos leer las palabras que se hallen en un radio de dos centímetros del centro de la mirada, pero no las más alejadas. Si no padecemos ningún defecto, seremos conscientes de la presencia de texto más allá, si bien no lograremos verlo con la alta resolución espacial que requiere la lectura.

En nuestro quehacer diario se nos pasa inadvertido un fenómeno sorprendente: no llega al 1 % la fracción que, de cada imagen, se recibe y procesa a alta resolución. Semejante inconsciencia se debe, en buena medida, al rápido movimiento de los ojos que nos permite centrar en la parte de la imagen que capta nuestro interés inmediato. Cuando prestamos atención, movemos los ojos de suerte tal, que el punto de interés se representa en la región central de la retina, esa fina lámina de neuronas que tapiza la pared posterior del globo ocular. La región central, la única parte de la retina que facilita visión de alta resolución, se llama fóvea; la mácula es la zona, algo mayor, con centro en la fóvea.

Al destinar más del 99 % de la retina a la visión de baja resolución, el sistema visual humano hace un uso eficiente de un limitado número de neuronas retinianas. Semejante disposición comporta, sin embargo, un riesgo notable: si por enfermedad queda dañada la retina central, el individuo sufrirá una pérdida importante de agudeza visual en el campo central de la visión. Así acontece en la degeneración macular, una patología que afecta a millones de personas en todo el mundo, de edad avanzada la mayoría. Hay pocos puntos del cuerpo humano donde la pérdida o disfunción de una pieza hística tan exigua —de unos 2 mm de diámetro— acarree consecuencias tan desastrosas.

Desde hace tiempo los oftalmólogos pueden diagnosticar con precisión la degeneración macular. No podemos decir otro tanto de la determinación de sus causas. Pero han comenzado a andarse los primeros pasos. Mediante la identificación de los procesos que desembocan en la lesión de la retina central, se espera desarrollar nuevos tratamientos que demoren o detengan el progreso de la degeneración macular. Quizá con el tiempo descubramos técnicas eficaces para reparar las lesiones retinianas.

1. PERDIDA DE VISION causada por la degeneración macular. Se simula en esta imagen, donde se demuestra qué vería un paciente si se fijara en la letra "L" de la tercera línea del tablón. La "L" se le aparece borrosa porque la degeneración macular daña el centro de la retina, responsable de la visión de alta resolución. La "E" del ápice del tablón y las líneas inferiores le resultan también borrosas porque la visión periférica tiene siempre baja resolución, incluso en ojos sanos.

Así funciona la retina

Consideremos una retina normal. La luz penetra en el ojo a través de la pupila y es focalizada por el cristalino para formar una imagen en la retina; aquí la aprehenden conos y bastoncillos, células fotorreceptoras especializadas. Los bastoncillos se encargan de la visión en condiciones de escasa iluminación; corresponde a los conos la visión con luz intensa, y éstos son, además, sensibles a los colores. Cada célula fotorreceptora tiene un largo apéndice, el segmento externo, repleto de ciertas proteínas que absorben luz y portan y amplifican la información relativa a la intensidad y duración del estímulo. A la forma del segmento externo deben su nombre las células fotorreceptoras. El segmento externo de un cono se estrecha hacia la punta, en tanto que el segmento externo de un bastoncillo permanece cilíndrico en toda su longitud.

En cada segmento externo del fotorreceptor hay cientos de sacos membranosos aplanados, los discos,

ordenados a la manera de una pila de tortitas superpuestas. Los discos y las proteínas especializadas se sintetizan en el soma celular de los fotorreceptores; se ensamblan en la base del segmento externo. Cada fotorreceptor sintetiza, en un día, cerca del 10 % del segmento externo. A medida que este material se va añadiendo a la base del segmento externo, se desprende la punta del segmento externo, degradada por una lámina especializada de células; el epitelio pigmentario de la retina (EPR), que así se llama esa hoja, se halla detrás mismo de la retina. Con toda probabilidad, el sistema en cuestión constituye una vía de reemplazo de componentes proteicos y lipídicos del segmento externo que han sufrido daños químicos por exposición a la luz y al oxígeno, en un proceso de fotooxidación.

El EPR presta otros servicios a las células fotorreceptoras. Mantiene la correcta composición iónica del fluido que rodea a los fotorreceptores. Procesa y recicla el derivado de la vitamina A que los fotorreceptores utilizan para la detección de la luz. Transporta y filtra nutrientes procedentes de los vasos sanguíneos coroideos, que residen detrás del EPR. Por último, y de ahí su nombre, el EPR está profusamente pigmentado. Contiene éste gránulos de melanina para absorber la luz que atraviesa los fotorreceptores, reduciendo al mínimo la pérdida de la calidad de imagen que la luz difusa del interior del ojo provocaría.

El rasgo distintivo de la degeneración macular estriba en una disminución de la visión central, pero la apariencia de la retina difiere bastante de un paciente a otro. El daño macular en personas mayores —conocido por degeneración macular asociada a la edad (DMAE)— se encuentra a menudo unido a la merma de células del EPR. Al observar la retina a través del oftalmoscopio, tal disminución celular se evidencia en zonas sin pigmentar o irregularmente pigmentadas. Para analizar con mayor precisión la pérdida de células del EPR nos valemos de la angiografía por fluoresceína (AGF), técnica empleada por el oftalmólogo para ver los vasos sanguíneos del ojo mediante la inyección de un colorante fluorescente en el torrente circulatorio. En un ojo normal, el colorante fluorescente se percibe sin dificultad en los finos vasos sanguíneos de la retina. Pero el colorante no se aprecia, o se ve a una intensidad muy reducida, en los vasos coroideos, harto más extensos, debido a que éstos quedan detrás de la hiperpigmentación del EPR. En un ojo con DMAE, sin embargo, cualquier área carente de células del EPR revelará el colorante en el seno de la circulación coroidea.

En un 10 % de los individuos con DMAE, la angiografía por fluoresceína podría también descubrir un problema más preocupante, a saber, la neovascularización: formación de nuevos vasos sanguíneos desde la coroides que irrumpen en la retina. En condiciones normales, una lámina fina de proteínas extracelulares y cadenas de polisacáridos (la membrana de Bruch) separa del EPR los vasos sanguíneos coroideos. Cualquier intrusión de vasos coroideos a través de la membrana de Bruch resulta inquietante por la tendencia de los nuevos vasos a la hemorragia, que suele terminar en lesión irreversible de la retina. Además, los fallos en la membrana de Bruch permiten la acumulación de fluido en la parte inferior del EPR o entre la retina y el EPR, una condición que bloquea el intercambio de gas y nutrientes entre la retina y el suministro de sangre coroidea.

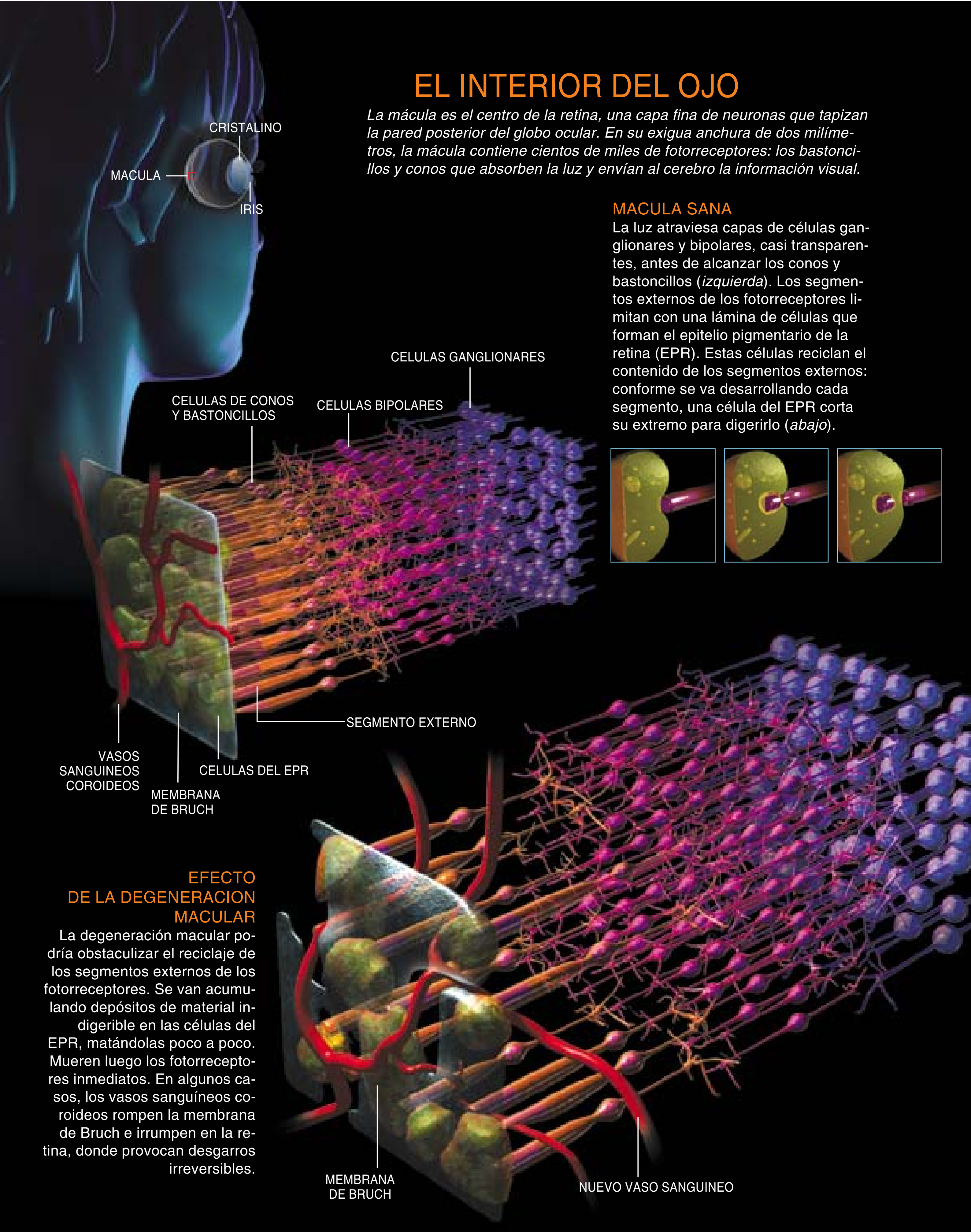
En el ojo adulto, cualquier vacío que se forme en el interior de la capa del EPR con resultado de muerte celular se rellena de modo imperfecto con nuevas células del EPR, tal vez debido a limitaciones de la división y diferenciación celulares. ¿Por qué malfuncionan o mueren las células del EPR a medida que envejecemos? El talón de Aquiles del EPR podría esconderse en su misión recicladora de los segmentos externos de los fotorreceptores. Las células del EPR son grandes y planas; cada una da cuenta de unos 50 fotorreceptores. Por consiguiente, cada célula del EPR puede rodear y degradar el 10 % de 50 segmentos externos cada día a lo largo de la vida del individuo. Esta dieta diaria equivale, en masa, a cinco eritrocitos, convirtiendo a la célula del EPR, de lejos, en la célula fagocítica más activa del organismo. (Se llama fagocitosis al proceso por el cual una célula engloba e ingiere partículas y otro material extraño para su degradación.)

Conforme envejecemos, las células del EPR acumulan lipofuscina; no tardan en formarse debajo del EPR drusas, o pequeños depósitos. Aunque se desconoce la exacta composición química de ese material subcelular, lo mismo la lipofuscina que las drusas constan, en parte al menos, de desechos indigeribles abandonados tras la digestión de miles de segmentos externos. Las drusas alcanzan un tamaño suficiente para dejarse ver a través del oftalmoscopio; su abundancia guarda presumible correlación con el riesgo de la disminución de agudeza visual en la DMAE.

De acuerdo con la investigación epidemiológica, los únicos factores que mantienen una firme correlación con el riesgo de desarrollar la DMAE son la edad, tabaquismo e historia familiar de la enfermedad. Entre los norteamericanos la DMAE está presente en el 5, 10 y 20 % de las personas de 60, 70

Resumen/Enfermedad macular

- Para ver un objeto en alta resolución, el observador ha de girar los ojos de suerte tal que la imagen del objeto se forme en la región central de la retina. La degeneración macular daña severamente dicha región, con la pérdida consiguiente de agudeza visual.
- La enfermedad macular en los ancianos se llama degeneración macular asociada a la edad (DMAE). Esta alteración conduce a la pérdida de células especializadas de la retina que ayudan a las neuronas fotorreceptoras (conos y bastoncillos).
- Puesto que una historia familiar de DMAE constituye un factor de riesgo se buscan los genes vinculados con esa patología. Del estudio de los genes en cuestión y de las proteínas por ellos cifradas habrá de salir el método más idóneo para demorar o suspender el avance de la enfermedad.


EL INTERIOR DEL OJO
La mácula es el centro de la retina, una capa fina de neuronas que tapizan la pared posterior del globo ocular. En su exigua anchura de dos milímetros, la mácula contiene cientos de miles de fotorreceptores: los bastoncillos y conos que absorben la luz y envían al cerebro la información visual.
CRISTALINO
MACULA
IRIS
MACULA SANA
La luz atraviesa capas de células ganglionares y bipolares, casi transparentes, antes de alcanzar los conos y bastoncillos (izquierda). Los segmentos externos de los fotorreceptores limitan con una lámina de células que forman el epitelio pigmentario de la retina (EPR). Estas células reciclan el contenido de los segmentos externos: conforme se va desarrollando cada segmento, una célula del EPR corta su extremo para digerirlo (abajo).
CELULAS GANGLIONARES
CELULAS DE CONOS Y BASTONCILLOS
CELULAS BIPOLARES
SEGMENTO EXTERNO
VASOS SANGUINEOS COROIDEOS
CELULAS DEL EPR
MEMBRANA DE BRUCH
EFECTO DE LA DEGENERACION MACULAR
La degeneración macular podría obstaculizar el reciclaje de los segmentos externos de los fotorreceptores. Se van acumulando depósitos de material indigerible en las células del EPR, matándolas poco a poco. Mueren luego los fotorreceptores inmediatos. En algunos casos, los vasos sanguíneos coroideos rompen la membrana de Bruch e irrumpen en la retina, donde provocan desgarros irreversibles.
MEMBRANA DE BRUCH
NUEVO VASO SANGUINEO

Los autores

HUI SUN y JEREMY NATHANS, miembros del Instituto Howard Hughes de Medicina, han venido investigando juntos la retina, a lo largo de los últimos ocho años, en la facultad de medicina de la Universidad Johns Hopkins. En ese centro recibió Sun el doctorado en biología molecular y genética. Nathans se doctoró en bioquímica por Stanford.

y 80 años, respectivamente. Aunque la mayoría de estos individuos tienen estadios tempranos de la enfermedad con merma mínima de la función visual, corren un riesgo importante de avanzar hacia formas más severas.

La relación genética

El descubrimiento de que una historia familiar de DMAE constituye un factor de riesgo sugiere que la enfermedad podría tener un componente genético. Evidentemente, la concentración por familias podría reflejar no tanto la compartición de genes cuanto un factor ambiental común. Pero de la investigación de mellizos idénticos (univitelinos) o fraternales (bivitelinos) se desprende que los mellizos idénticos manifiestan un 100 % de concordancia de DMAE: si un miembro del par padece DMAE, resulta casi seguro que se verá también afectado el otro mellizo. En el caso de los gemelos fraternales la concordancia es inferior al 50 %. La interpretación directa de estos datos indica que gemelos idénticos presentan un grado más alto de concordancia porque son genéticamente idénticos. (En promedio, los gemelos fraternales comparten la mitad de sus genes.)

Los datos de gemelos ofrecen pruebas convincentes de un componente genético en la DMAE, pero no revelan si éste refleja la acción de 1, 10 o 100 genes. Tampoco nos aporta un método sencillo de identificar los genes pertinentes. Además, la DMAE presenta un reto especial al método estándar de identificación de genes implicados en patologías, que requiere el estudio de familias con un gran número de individuos afectados. Una enfermedad que ocurre en fases avanzadas de la vida se encontrará sólo, por norma, en una fracción restringida de miembros de la familia en cuestión, porque muchos individuos serán demasiados jóvenes para mostrar signos de la patología y otros habrán muerto antes de manifestar síntoma alguno.

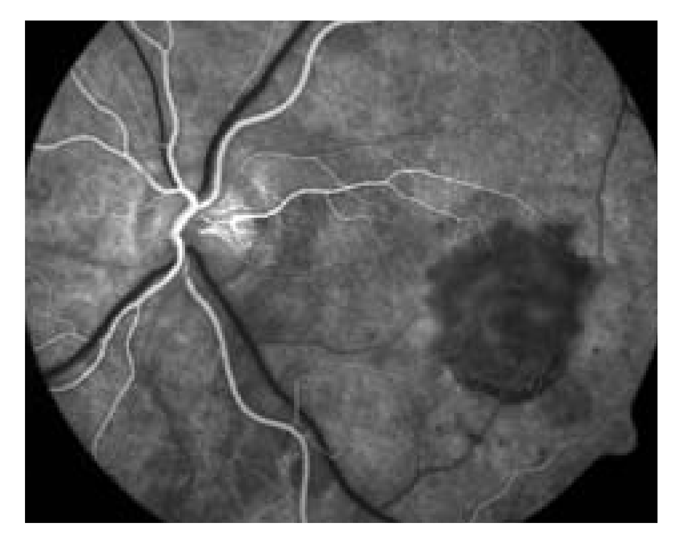
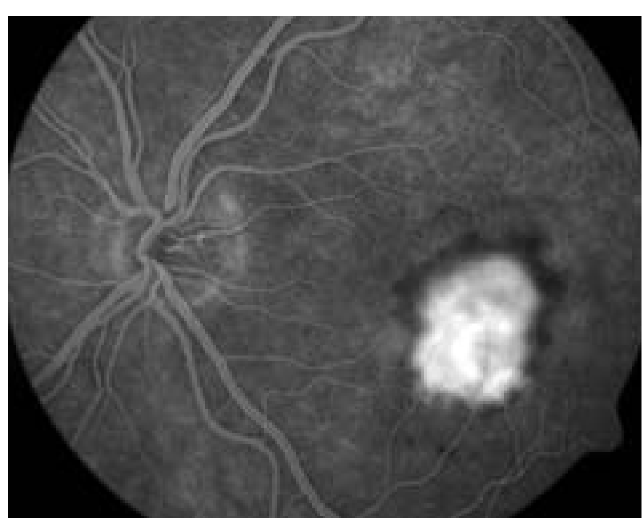
Para salvar esas dificultades, la investigación se ha centrado en un grupo de enfermedades maculares menos frecuentes que ocurren en momentos anteriores de la trayectoria vital y que evidencian pautas claras de herencia. De ellas, las patologías sometidas a un estudio más intenso han sido la drusa familiar dominante, la distrofia macular viteliforme, la enfermedad de Sorby y la distrofia macular de Stargardt. Todas afectan a la retina central y están asociadas a una acumulación de material en el interior del EPR o debajo del mismo. De las cuatro especies morbosas, la distrofia de Stargardt es la más común; se da en 1 de cada 10.000 personas. Aunque cada una de estas patologías de aparición temprana merece por sí misma un estudio detenido, su similitud con la DMAE nos aporta la ventaja adicional de que podrían descubrir claves fundamentales para entender las causas del trastorno asociado a la edad.

La rigurosa investigación en familias afectadas desarrollada a lo largo de los últimos años ha desembocado en la identificación de los genes responsables de la patología de manifestación precoz. En cada caso, se determinó, por comparación de pautas hereditarias, la ubicación cromosómica del gen de interés; luego, se identificó a éste mediante el descubrimiento de cambios en su secuencia de ADN, mutaciones que distinguen del normal al gen afectado. En tres de las patologías, se observó que cualquier mutación, de entre un amplio repertorio, en los genes pertinentes podía desencadenar el trastorno. De esa regla se aparta, sin embargo, la drusa familiar dominante: todos los que la padecen portan la misma mutación. Por lo que dicen los datos, los individuos afectados de Europa y Estados Unidos comparten un antepasado común que adolecía de la misma mutación.

Cerrado ese capítulo, la investigación abordó luego las proteínas producidas por estos genes determinantes de las enfermedades. A este respecto, el mecanismo de la enfermedad de Stargardt es el que mejor se conoce. Aunque caracterizada por una acumulación masiva de lipofuscina en el EPR, sabemos ahora que el defecto primario reside en los segmentos externos de los fotorreceptores. El gen de la enfermedad de Stargardt cifra una proteína de transporte, denomi-

UNA ENFERMEDAD DE LA VEJEZ

2. LA DEGENERACION MACULAR afecta, sólo en Norteamérica, a cerca de 2 millones de individuos. Casi un quinto de los que han cumplido 80 años sufren de maculopatía asociada con la edad, la forma más común de la enfermedad. Esta patología va asociada a la pérdida de células del EPR. Cerca del 10 % de estos pacientes presentan también neovascularización, que provoca una pérdida severa de visión.

3. ANGIOGRAFIA POR FLUORESCEINA, técnica de la que se valen los oftalmólogos para observar los efectos de la degeneración macular mediante la inyección de un colorante fluorescente en la corriente sanguínea. A los 12 segundos de la inyección, el colorante ilumina las arterias de la retina, mientras que las venas permanecen oscuras (*izquierda*). La mácula aparece oscura debido a la hemorragia, en la región central de la retina, provocada por la rotura de vasos neoformados. Transcurrido medio minuto, la mácula se torna brillante debido a la sangre coloreada que ha fluido de los nuevos vasos, también en la retina (*derecha*).

nada ABCR, que se aloja en las membranas de los discos del segmento externo. A tenor de los experimentos, la proteína ABCR utiliza ATP, la fuente de energía química de la célula, para transportar un derivado de vitamina A hasta el interior de la célula fotorreceptora.

Esta reacción de transporte se integra en un ciclo más extenso que restablece el suministro de 11-cis retinal en el segmento externo del fotorreceptor; esa molécula es la forma fotosensible de vitamina A. El proceso de la absorción lumínica en el fotorreceptor convierte al 11-cis retinal en su derivado afín trans-retinal, que, liberado en la membrana del disco, experimenta una modificación química para su transporte hasta una célula del EPR. Las alteraciones de la proteína ABCR, sin embargo, demoran la modificación química del trans-retinal, con la consiguiente acumulación del componente. Por desgracia, el trans-retinal reacciona de modo espontáneo a baja velocidad con lípidos de membrana para formar A2E, un derivado estable que se resiste a la degradación. A medida que las células del EPR engloban segmentos externos, la sustancia A2E se acumula en las células en forma de lipofuscina. Hay pruebas recientes de que A2E perjudica la viabilidad del EPR al exponer las células a una lesión lumínica.

¿Existe relación entre el mecanismo de la enfermedad de Stargardt y el de la DMAE? Del descubrimiento de la acumulación de A2E en el EPR de un ojo humano que envejece, aunque a niveles inferiores que en los ojos afectados por la enfermedad de Stargardt, se infiere una conexión potencial. De hecho, A2E se identificó primero como uno de los componentes principales de lipofuscina en los ojos de las personas mayores. Este descubrimiento da a entender que los efectos ejercidos por A2E en los ojos normales podrían ser similares a los que opera en los ojos con enfermedad de Stargardt. Una segunda conexión nos viene sugerida por la investigación genética: en individuos con DMAE se ha observado una mayor frecuencia de dos cambios en la secuencia de ADN del gen ABCR que en la población general. Cabe, pues, pensar que algunos casos de DMAE al menos podrían estar influidos por cambios en la secuencia del gen ABCR.

Otros estudios de tenor semejante acometidos en los genes responsables de las demás enfermedades de manifestación precoz no han revelado ninguna mutación de dichos genes en individuos con DMAE. Importa, sin embargo, seguir investigando esas patologías exhaustivamente; las alteraciones funcionalmente similares en bioquímica y biología celular podrían quizá desempeñar un papel también en la DMAE. En este sentido, la investigación apunta a que las mutaciones genéticas que causan la distrofia de la enfermedad de Sorby podrían minar la capacidad del ojo a la hora de degradar material extracelular, la membrana de Bruch por ejemplo. En los sujetos con esa patología, aumenta de espesor la membrana de Bruch con la reducción consiguiente de la llegada de nutrientes esenciales al EPR y la retina. Se conocen bastante peor los mecanismos de la drusa familiar dominante y de la distrofia macular viteliforme; con todo, los datos recabados sugieren que estas enfermedades podrían obstaculizar el funcionamiento normal de la membrana de Bruch y el EPR.

Otra línea de investigación se ha centrado en la degeneración retiniana causada por el propio proceso de la visión. La absorción de luz por la vitamina A y sus derivados en la retina produce radicales libres: compuestos que contienen oxígeno con electrones desapareados. Son muy reactivos. El estudio de orga-

nismos tan dispares como son el hombre y la bacteria ha demostrado que los radicales libres constituyen un agente importante de alteraciones para la mayoría de los seres, si no para todos. Además, la investigación sobre degeneración retiniana en animales de laboratorio sugiere que este tipo de daño interesa fotorreceptores y EPR. No deja de ser una paradoja de la naturaleza el comprobar que las mismas propiedades fotoabsorbentes que hacen de la vitamina A y sus derivados unos valiosísimos sensores visuales las erijan también en productores eficaces de radicales libres.

En varios estudios epidemiológicos se ha examinado hasta qué punto la exposición a la luz en el curso de la vida constituye un factor de riesgo para la DMAE. Según ciertos datos, unos niveles de exposición a la luz altos podrían aumentar la probabilidad de desarrollar la enfermedad. Además, el daño por fotooxidación podría redoblarse con A2E, molécula que se supone fomenta la producción de radicales libres en el EPR.

¿De qué modo pueden la retina y el EPR minimizar el daño fotooxidativo? La retina contiene concentraciones sustanciosas de antioxidantes químicos que absorben con eficacia radicales libres. En la mácula hay elevadas concentraciones de zeaxantina y luteína; un tercer antioxidante, la vitamina E, abunda en los segmentos externos de los fotorreceptores y también en el EPR. Estos tres antioxidantes provienen de plantas; espinacas y coles, entre otros vegetales de hoja verde oscura, son particularmente ricos en zeaxantina y luteína.

Las células del organismo conocen otras defensas. Así, la enzima superóxido dismutasa (que contiene zinc) y la catalasa; ambas inactivan los radiales libres. A raíz de tales observaciones piensan algunos que, si se incrementara la cantidad de zeaxantina, luteína y zinc en la dieta, podría reducirse el riesgo de DMAE o demorar su aparición. Pero los estudios epidemiológicos acometidos para avalar dicha correlación han dado resultados contradictorios. No hay una convergencia de criterios clara sobre la eficacia de la introducción de suplementos dietéticos para disminuir el riesgo de enfermedades maculares.

Tratamiento

En la actualidad, los únicos tratamientos aceptados para la degeneración macular son los encaminados a la destrucción de los nuevos vasos sanguíneos que se han formado a través de la membrana de Bruch. La fotocoagulación, en torno a la cual gira la terapia seguida, consiste en cauterizar los vasos con un láser muy focalizado y dirigido contra la diana subretinana a través de la córnea y el cristalino. Por desgracia, el calentamiento local produce un daño irreversible en el sitio sometido a la irradiación. Se confía en la terapia fotodinámica, un nuevo tratamiento por láser, que podría obviar buena parte del problema al concentrarse mejor en la destrucción de los nuevos vasos sanguíneos. En esta terapia, se inyecta en el paciente, por vía intravenosa, un colorante que absorbe la luz, un fotosensibilizador. Se enfoca luego, sobre los vasos neoformados, un haz láser de baja energía. Cuando el fotosensibilizador absorbe la luz láser, produce una alta concentración de radicales libres que destruyen los vasos sanguíneos, dejando punto menos que intacta la retina adyacente. La terapia fotodinámica se halla en fase avanzada de ensayo clínico. Podríamos contar con ella de aquí a un par de años.

Aunque la neovascularización constituye la principal amenaza planteada por la DMAE contra la visión, en el 90 por ciento de quienes sufren la pato-





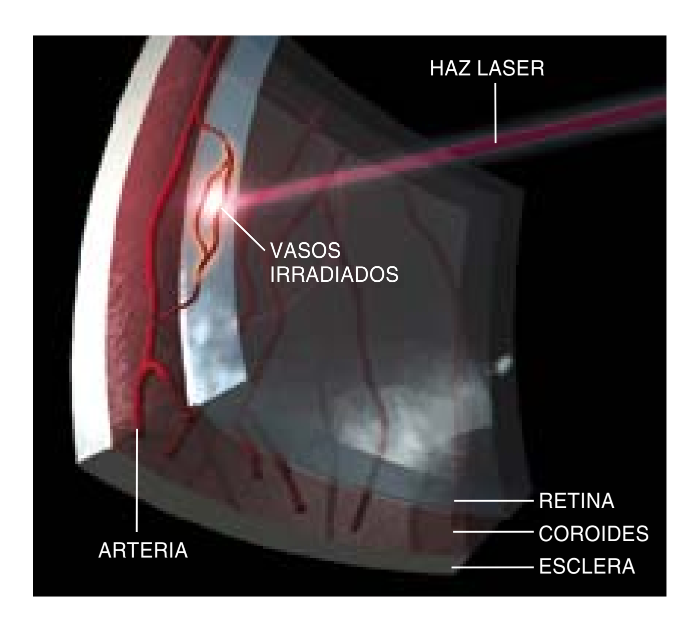
4. LA IMPORTANCIA DE LA MACULA queda patente en este par de fotografías. Una persona de ojos sanos ve los objetos con mayor claridad si atiende al campo visual central que si sus ojos se ocupan de la periferia (*izquierda*), porque la parte central de la retina es la única región que posibilita la visión de alta resolución. La degeneración macular daña esta parte de la retina, motivo por el cual aparece borroso el campo central (*derecha*).

logía no se percibe tal síntoma y, por ende, no son candidatos al tratamiento. Además la terapia de fotocoagulación y la de fotodinámica ni corrigen ni disminuyen el proceso de la enfermedad subyacente; por consiguiente, los individuos que han recibido estos tratamientos continúan expuestos al desarrollo de nuevos vasos sanguíneos.

¿Que formas podría tomar en el futuro la terapia? Se están investigando varios métodos alternativos de remover los nuevos vasos sanguíneos o frenar su expansión. En este sentido, se ha tomado en consideración la extirpación microquirúrgica de los vasos mediante una pequeña incisión en la retina, así como la irradiación de alta energía en la parte posterior del ojo, aplicando técnicas habituales en oncoterapia por radiación. La rotación retiniana constituye otro enfoque de interés. En este método, se alza cuidadosamente la retina desde el EPR subyacente, se la gira unos grados en torno al nervio óptico y se la deja descansar sobre un nuevo lugar del EPR. Si antes de proceder a la intervención quirúrgica se descubre que hay una merma de células del EPR o que se han formado nuevos vasos sanguíneos bajo la fóvea, se gira ésta para que repose sobre una zona más sana del EPR. Como cabía esperar, la rotación de una de las retinas provoca que el cerebro reciba señales contradictorias de ambos ojos. Para nuestra fortuna, el problema admite una solución quirúrgica: se alargan o acortan varios músculos alrededor del globo ocular para producir una rotación compensatoria de todo el ojo en la dirección opuesta.

Otra posibilidad sugerente es el trasplante de células del EPR. En estudios realizados con animales de laboratorio, se ha obtenido el crecimiento de células del EPR fuera del cuerpo y, con una alta tasa de éxito, su trasplante bajo la retina. Entre las cuestiones abiertas está el aclarar si la técnica puede demorar o suspender la pérdida de función visual en humanos y si pueden avanzar las técnicas microquirúrgicas hasta lograr alojar las células bajo la fóvea sin que ello comporte un daño adicional. Lo mismo que en los procedimientos de trasplante, el rechazo inmunitario puede limitar a largo plazo la supervivencia de las células donantes si éstas proceden de otro individuo, problema que podría salvarse si las células donantes del EPR fueran de la retina periférica del propio paciente.

Se explora incluso la reparación o regeneración de la retina, un objetivo reputado imposible tiempo atrás, porque la retina de los mamíferos adultos no muestra señales de ulteriores divisiones celulares. Pero en especies de peces cuya retina adquiere una complejidad similar a la nuestra se ha observado que la regeneran siendo adultos. En esas especies, las células madre —que se dividen y diferencian en todos los tipos celulares retinianos— residen en los bordes externos de la retina y dirigen su desarrollo continuo. De acuerdo con trabajos recientes podría haber, en estado latente, células madre similares en los bordes de la retina de los mamíferos. Quizás estas células podrían estimularse o trasplantarse para reparar una retina o un EPR dañados.



5. EN LA TERAPIA FOTODINAMICA encontramos un método prometedor para determinados casos de degeneración macular. Se inyecta en el paciente un fotosensibilizador, es decir, un colorante que absorbe la luz. Se enfoca luego un haz láser de baja energía sobre los nuevos vasos sanguíneos que han irrumpido en la retina. Cuando el fotosensibilizador absorbe la luz láser, produce radicales libres que destruyen los vasos sin apenas alterar la retina adyacente.

El gasto y el riesgo de estas terapias de la enfermedad macular constituirán, a buen seguro, una cortapisa para los pacientes que se enfrentan a una grave pérdida inminente de visión. Sería, pues, de desear que dispusiéramos de un tratamiento menos invasivo, capaz de frenar o detener en fase precoz el proceso morboso. Compete a la investigación básica en patología bioquímica y celular de la degeneración macular poner los fundamentos para alcanzar dicha meta. No está fuera de razón esperar que la ciencia encuentre productos naturales o sintéticos que mejoren la función o prolonguen la viabilidad de las células del EPR. Semejantes compuestos estarían capacitados, por ejemplo, para proteger de lesiones fotooxidativas al EPR o reforzar su eficacia degradadora de los segmentos externos de los fotorreceptores. Aunque la identificación de esas intervenciones en la degeneración macular parezca harto compleja, no debe olvidarse que, para una enfermedad que invierte decenios en su desarrollo, cualquier tratamiento que frene su avance en un 10 o 20 % tendrá una incidencia importante.

Bibliografía complementaria

AGE-RELATED MACULAR DEGENERATION. Dirigido por Jeffrey W. Berger, Stuart L. Fine y Maureen G. Maguire. Mosby, 1999.



La vida en el universo

Sólo una parte de nuestra galaxia reúne las condiciones necesarias para albergar formas complejas de vida

Guillermo González, Donald Brownlee y Peter D. Ward

En los relatos de fantasía científica, el protagonista acostumbra ser un viajero interestelar que visita lugares exóticos de la Vía Láctea habitados por otros seres inteligentes. Cualquiera que sea el lugar, siempre encuentra una civilización desarrollada. Da lo mismo que sea el centro galáctico, un cúmulo globular, una región de formación estelar, un sistema de estrellas binarias o una estrella enana roja.

Los escritores del género deben en parte el estímulo de su creatividad a los científicos, que persisten en arruinarles la trama. Tenía cierto aire de verosimilitud la presencia de individuos en la Luna, Marte, Venus, Júpiter e incluso en el Sol, pero los marcianos constructores de canales y los oasis frescos del interior solar no lograron resistir la segur de la ciencia. Si los novelistas sitúan ahora más lejos sus fabulaciones, la investigación no se queda atrás. Y ésta se muestra escéptica sobre las posibilidades de vida inteligente en la Vía Láctea. Si la mayor parte del sistema solar resulta hostil para los organismos, lo mismo puede predicarse de la galaxia.

Dentro de un sistema planetario, los astrónomos llaman zona de habitabilidad circumestelar (ZHC) a los lugares idóneos para el desarrollo de la vida. Indica, en general, la región en torno a una estrella donde puede persistir agua líquida en la superficie de un planeta terrestre, al menos durante algunos miles de millones de años. Esta zona tiene forma de anillo, cuyo borde interior representa la máxima proximidad que un planeta puede alcanzar en su órbita alrededor de su estrella sin perder los océanos en el espacio; en el caso más extremo, el efecto invernadero podría retener los océanos en ebullición (así ha ocurrido con Venus). El borde exterior de dicha zona señala la máxima lejanía que un planeta puede ocupar antes de que los océanos se congelen. Los astrónomos estiman el tamaño de la ZHC en torno a una estrella de cualquier masa a partir de principios elementales de física estelar.

1. PANORAMA DESOLADOR de un mundo golpeado por cometas, achicharrado por supernovas y a punto de ser enviado al espacio profundo por una masa gigante de gas. Así ha visto el artista un planeta estéril, asimilado a los cuerpos rocosos de nuestra galaxia.

Cierto es que en la habitabilidad de un planeta intervienen también la elipticidad de su órbita, la compañía de lunas grandes y la presencia de planetas gigantes, por no hablar de los detalles de su biología. Pero si un planeta orbita fuera de la zona, ningún factor de ésos importa. Tampoco interesa mucho saber dónde se encuentra la ZHC de un sistema planetario si éste reside en la parte hostil de la galaxia.

Con tales prenotandos, en 1999 propusimos la noción de equivalente galáctico de la ZHC: la zona de habitabilidad de la galaxia (ZHG). La ZHG define las regiones más hospitalarias de la Vía Láctea, vale decir, las que no caen ni muy próximas ni muy alejadas del centro galáctico. No fuimos los primeros en abordar la habitabilidad en este contexto más amplio. A lo largo de los últimos diez años, Virginia Trimble, de la Universidad de Maryland y de la de California en Irvine, ha venido escribiendo sobre la relación entre la composición quí-

Los autores

GUILLERMO GONZALEZ, DONALD BROWNLEE y PETER D. WARD comparten un interés común en la habitabilidad de los planetas, un campo donde convergen astrofísica y geofísica. Los tres participan en el programa de astrobiología de la Universidad de Washington. González, profesor de la estatal de Iowa, se doctoró con una tesis sobre las composiciones químicas de estrellas muy evolucionadas de cúmulos globulares. Brownlee, especialista en cometas y meteoritos, dirige las investigaciones de la misión *Stardust*, que regresará a la Tierra con muestras de polvo cometario en 2006. Ward, paleontólogo, estudia las extinciones en masa a escala planetaria.

mica galáctica y las condiciones necesarias para la vida. Pero en fechas recientes se produjo un avance espectacular con el descubrimiento de planetas gigantes del tamaño de Júpiter alrededor de otras estrellas similares al Sol.

No todas las estrellas de tipo solar tienen planetas de ese tenor. Los planetas gigantes descubiertos hasta la fecha se encuentran principalmente alrededor de estrellas ricas en elementos químicos más pesados que el helio, "metales" en la jerga de los astrónomos para irritación de los químicos. Esta correlación nos sugiere que el contenido metálico constituye un factor decisivo a la hora de formar planetas gigantes. (Con la técnica disponible no podemos detectar planetas del tamaño de la Tierra.) Al propio tiempo, los astrónomos están adquiriendo conciencia de cuán letal puede resultar nuestra galaxia, repleta de estrellas que explotan y choques estelares. Incluso allí donde existen planetas, éstos podrían ser refractarios a la aparición de formas complejas de vida.

Resumen/Zona de habitabilidad

- ¿Qué es lo que un planeta necesita para mantener formas de vida compleja? Los astrónomos se han centrado en la estabilidad del agua superficial; fenómeno este que sólo es posible dentro de cierto intervalo de distancias del planeta a la estrella, es decir, en la zona de habitabilidad circumestelar. Sin embargo, tras los descubrimientos recientes de los planetas extrasolares, los investigadores han comenzado a tomar en cuenta un conjunto más amplio de condiciones.
- Idealmente, la estrella y su séquito planetario deberían orbitar a determinada distancia del centro de la galaxia. Si demasiado lejos, la nebulosa en la que la estrella nace carecerá de los elementos pesados que forman los planetas. Si demasiado cerca, las inestabilidades orbitales, las colisiones cometarias y las estrellas que explotan, entre otras adversidades, harán fracasar los ecosistemas en la misma cuna. La posición del Sol es justo la correcta.
- De todo lo anterior se desprende que la vida compleja constituye un acontecimiento raro en la galaxia.

¿Dónde está lo que hace falta?

Para determinar las fronteras de la zona galáctica de habitabilidad deben satisfacerse dos criterios: disponibilidad del material para crear el planeta habitable y aislamiento adecuado, libre de amenazas cósmicas. La historia de la evolución de los elementos químicos y su agrupación en la formación de la Tierra halla explicación en la cosmología moderna, la astrofísica estelar y las ciencias planetarias. En la gran explosión (big bang) se creó hidrógeno, helio y poco más. A lo largo de los siguientes 10.000 millones de años, se produjeron en las estrellas las reacciones de las que salió un conjunto rico de elementos. En el medio interestelar, la razón entre el número de átomos de metales y el número de átomos de hidrógeno —es decir, la "metalicidad"— aumentó gradualmente hasta alcanzar su valor actual.

Estos metales vienen a ser los bloques de construcción de los planetas terrestres. Su concentración condiciona el tamaño de los cuerpos planetarios, tamaño que, a su vez, determina si un planeta es capaz de retener una atmósfera y de experimentar actividad geológica. Es más, sin una cantidad suficiente de metales, no se pueden formar planetas gigantes, porque éstos se agrupan alrededor de un núcleo rocoso de un tamaño mínimo. Las observaciones de los planetas extrasolares comienzan a definir la metalicidad necesaria para erigir planetas gigantes. No se ha encontrado alrededor de una estrella ningún planeta de estas características con metalicidad inferior al 40 % de la solar. Según se publicó hace un año, el telescopio espacial Hubble no ha detectado ningún planeta en el cúmulo globular 47 Tucanae, cuyas estrellas tienen metalicidades un 25 % inferiores a la del Sol.

En el polo opuesto, una metalicidad muy alta plantea sus propios problemas. Los planetas terrestres serán mayores y, en razón de su gravedad más intensa, se hallarán enriquecidos en compuestos volátiles y ofrecerán un relieve topográfico empobrecido. Esta combinación de propiedades obliga a que el planeta entero se halle cubierto de agua, lo que labora contra el desarrollo de la vida. En nuestro planeta, la mezcla de tierra y mar resulta determinante para el control de la temperatura atmosférica y otros procesos. Una metalicidad elevada también aumenta la densidad del disco protoplanetario y, por tanto, provoca que los planetas gigantes cambien de posición. En razón de esa migración orbital se arrojarán los cuerpos menores, de tipo terrestre, fuera del sistema o se lanzarán contra el Sol.

En una investigación reciente Charles H. Lineweaver, de la Universidad de Nueva Gales del Sur, exploró la dependencia de la formación de planetas y la migración con respecto a la metalicidad. Dio por sentado que la probabilidad de formar un planeta

terrestre era proporcional a la metalicidad de la estrella progenitora, pues estrella y planeta surgieron de la misma nube de gas y polvo. De la estadística de los planetas extrasolares infería Lineweaver que la probabilidad de migración de los planetas gigantes crecía de una forma significativa con el aumento de la metalicidad, siendo la migración inevitable cuando el valor de ésta se cifraba en un 300 por ciento de la metalicidad solar. No obstante la provisionalidad de tales cálculos, sugeríase que una metalicidad próxima a la solar podría ser óptima para la formación de planetas (de la masa de la Tierra) en órbitas estables.

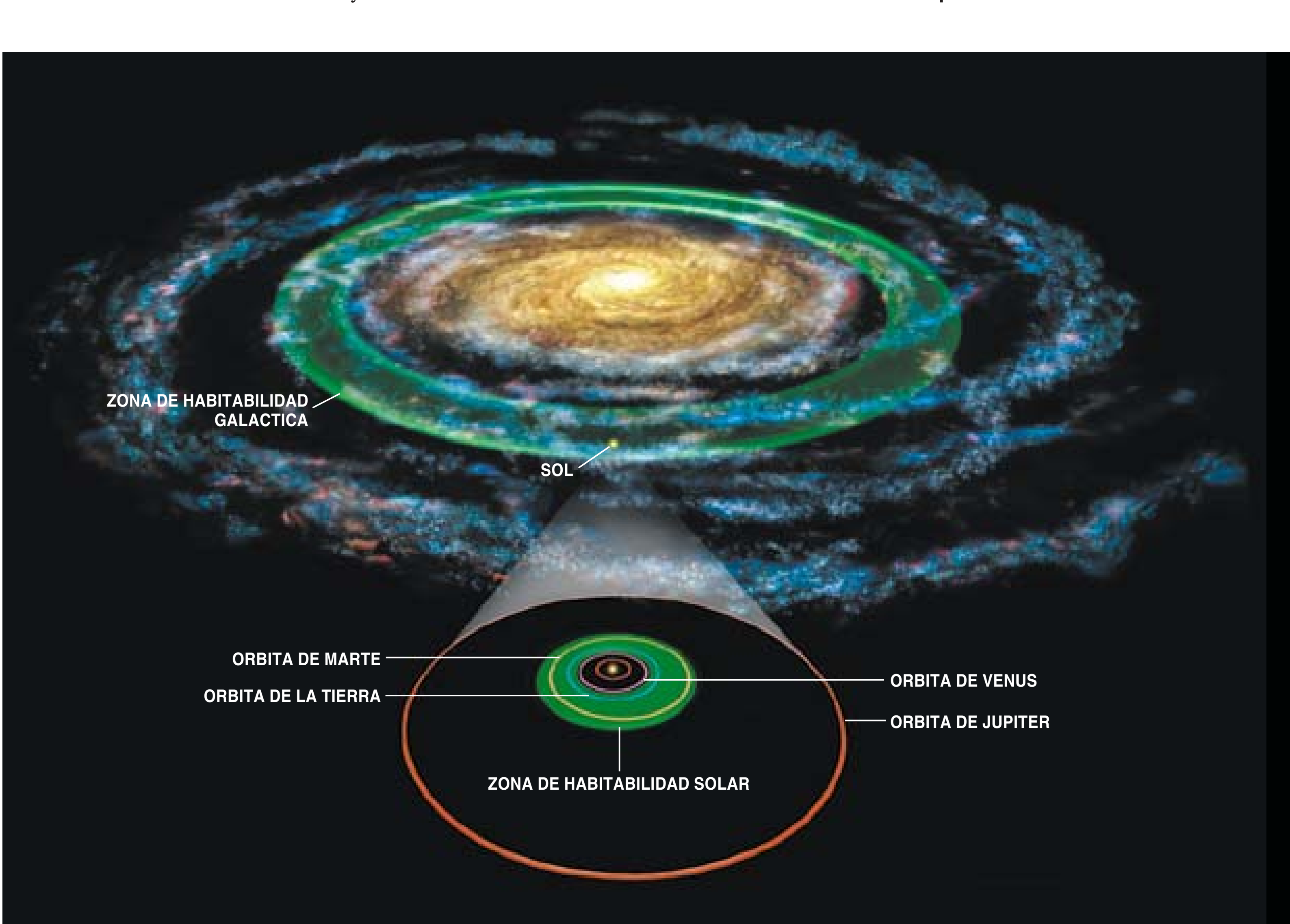
En el filo de la navaja

Sólo una parte de la Vía Láctea satisface ese criterio. Nuestra galaxia consta de cuatro regiones traslapantes: halo, bulbo, disco grueso y disco delgado. Las estrellas componentes de cada región giran alrededor del centro galáctico, a la manera en que los planetas del sistema solar dan vueltas en torno al astro. El halo y el disco grueso contienen estrellas pobres en metales y de una edad avanzada; es improbable que se hayan formado planetas terrestres del tamaño de la Tierra alrededor de dichas estrellas. Las estrellas del bulbo tienen un amplio rango de metalicidades, pero la radiación cósmica alcanza en esta zona niveles muy altos.

En el disco delgado se aloja nuestro Sol. La metalicidad del gas disminuye con la distancia al centro galáctico. Allí donde se sitúa el Sol, a unos 8,5 kiloparsecs (28.000 años-luz), la metalicidad decrece a un ritmo del 17 % por kiloparsec. El logaritmo de la metalicidad, parámetro cuya unidad es el "dex" (por definición el Sol tiene un valor de 0 dex), decae linealmente con la distancia, en una pendiente de –0,07 dex por kiloparsec. Para calcular el gradiente de metalicidad se atiende a los rasgos espectrales de cada uno de los tipos de estrellas y de nebulosas. Los distintos indicadores empleados comenzaron a converger hacia un mismo resultado hace apenas tres o cuatros años; hoy sabemos que las galaxias similares a la Vía Láctea presentan también parecidos gradientes de metalicidad en el disco.

El gradiente es un efecto de las variaciones en el ritmo de formación estelar. Lejos del centro de la galaxia existe proporcionalmente menos gas y, por

2. LA ZONA DE HABITABILIDAD de la Vía Láctea (*verde*) excluye las regiones interiores peligrosas y las regiones exteriores pobres en metales. Es análoga a la zona de habitabilidad de nuestro sistema solar (*panel interior*), salvadas las escalas. Ninguna de las dos zonas tiene bordes definidos. El bulbo galáctico se presenta en color amarillo; en azul y rosado, las regiones activas de formación estelar de los brazos espirales.



tanto, menos formación de estrellas. En consecuencia, los bordes exteriores galácticos no se han enriquecido como el interior. En el conjunto de la galaxia, el ritmo de formación estelar alcanzó su máximo hace de 8000 a 10.000 millones de años; desde entonces está decayendo. Hoy, la metalicidad en la vecindad solar aumenta un 8 % cada 1000 millones de años. Conforme vaya remitiendo el suministro de gas, la metalicidad crecerá a un ritmo más lento.

Conocidos el gradiente de metalicidad del disco y su evolución, podemos establecer los límites de la ZHG en el espacio y en el tiempo. Las estrellas que nacen ahora con una metalicidad entre el 60 y el 200 % del valor solar aparecen, por lo general, en un intervalo de distancias de entre 4,5 y 11,5 kiloparsecs del centro galáctico, en una región que contiene el 20 % de las estrellas de la galaxia. Sépase, además, que una estrella normal de la vecindad solar no alcanzó el límite del 60 % hasta hace 5000 o 6000 millones de años. El Sol mismo es un 40 % más rico en metales que otras estrellas contemporáneas que se formaron en el mismo lugar del disco. Este incremento del contenido metálico podría haber dado a la vida en la Tierra un fuerte impulso.

Telón de hierro

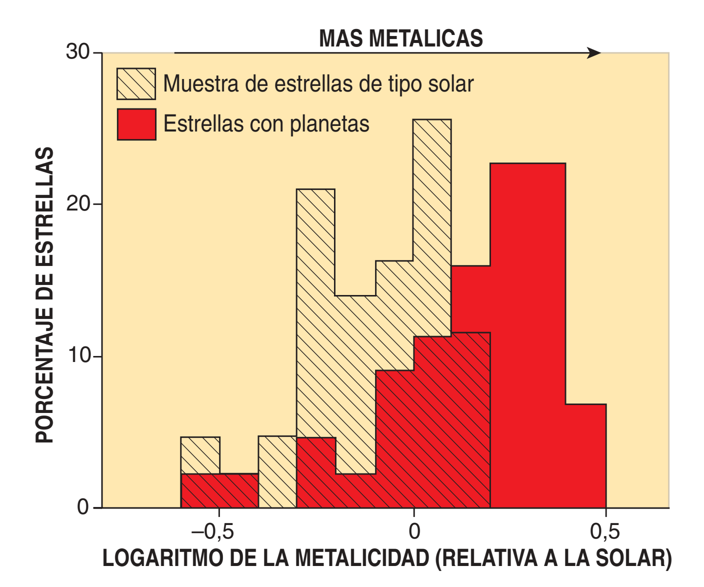
Una objeción plausible es que la correlación entre la metalicidad y los planetas detectados no indique un proceso de "causa a efecto". Quizá la causalidad opera en sentido opuesto: una alta metalicidad estelar no explicaría la presencia de planetas gigantes, sino que la presencia de planetas gigantes justificaría la alta metalicidad de la estrella. Tal acontecería si los planetas tendieran a caer hacia las estrellas, enriqueciéndolas en contenido metálico. La mayoría de los astrónomos admiten que las estrellas degluten planetas y cuerpos menores. Pero las capas estelares convectivas más externas alcanzan tal masa y se hallan tan mezcladas, que las estrellas necesitarían devorar una cantidad irracional de material planetario para dotarse de las altas metalicidades que se observan entre las estrellas con planetas.

Podría aducirse también que tal correlación resulta quizá de un sesgo observacional. Es harto difícil detectar planetas alrededor de estrellas deficientes en metales; el método más depurado para la observación de planetas se basa en las líneas espectrales, que son más débiles cuando una estrella tiene menos metales. No obstante, el rendimiento de la detección no cae de un modo reseñable hasta que la metalicidad de la estrella no está por debajo del 10 % del valor solar, inferior a todas luces al 40 % necesario para la formación de planetas gigantes. La correlación obtenida entre metalicidad y planetas parece ser bastante real.

La habitabilidad planetaria no depende sólo de la metalicidad. Importa la concentración relativa de los diferentes elementos. Los elementos más abundantes de la Tierra se produjeron, de manera principal, en las explosiones de supernova. Las hay de dos tipos. Los sucesos de tipo I, que resultan del estallido de una estrella enana blanca, originan sobre todo hierro, níquel y cobalto. Las supernovas de tipo II, que exigen la implosión de una estrella masiva, sintetizan oxígeno, silicio, magnesio, calcio y titanio. Reviste máximo interés que los sucesos de tipo II constituyan la única fuente natural para la creación de los elementos más pesados, como torio y uranio.

Puesto que el ritmo de formación de estrellas está decayendo en nuestra galaxia, el cómputo total de explosiones de supernova decrece, como disminuye la relación entre los sucesos de tipo II y los de tipo I. Las supernovas de tipo II van asociadas a estrellas masivas de corta vida, razón por la cual el ritmo de sucesos coincide más o menos con el ritmo de formación estelar. La frecuencia de supernovas de tipo I, por otra parte, depende de la producción de estrellas de masa intermedia de larga vida; presenta, pues, una respuesta más lenta a los cambios en el ritmo de formación estelar.

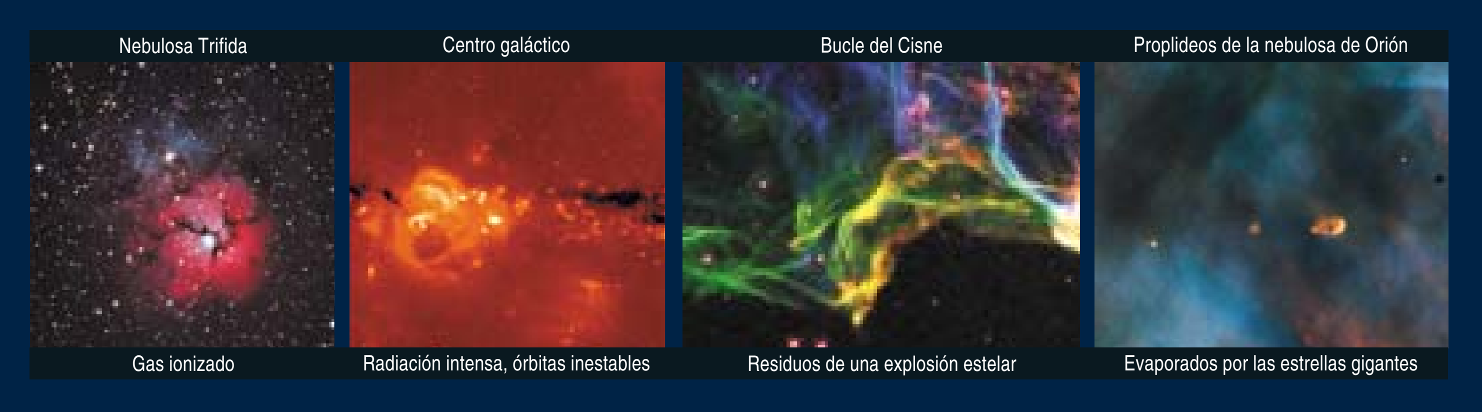
En virtud de esta variación en la relación de tipo de supernovas, las nuevas estrellas de tipo solar abundan más en hierro que las estrellas nacidas hace 5000 millones de años. Suponiendo que todo lo demás sea igual, eso significa que un planeta terrestre que se formara hoy tendría un núcleo de hierro proporcionalmente mayor que el de la Tierra. También mostraría, dentro de 4500 millones de años, un 40 % menos de temperatura a consecuencia de la desintegración del potasio, torio y uranio. El calor generado por estos isótopos radiactivos impulsa el movimiento de las placas tectónicas, que desempeñan una



3. LA BUSQUEDA DE PLANETAS EXTRASOLARES acometida por los astrónomos revela la importancia del suministro de material en la creación de planetas. Tal y como muestra el histograma, las estrellas que tienen planetas gigantes (*zona de color rojo*) encierran una concentración mayor de elementos pesados ("metales") que la media de las estrellas de tipo solar (*negro*).



4. LO HERMOSO, así en el espacio como en la Tierra, resulta con frecuencia peligroso. Algunos de los lugares más renombrados de la galaxia son hostiles para los planetas, no digamos para los seres vivos. Los lugares más seguros de la galaxia suelen ser también los más aburridos.



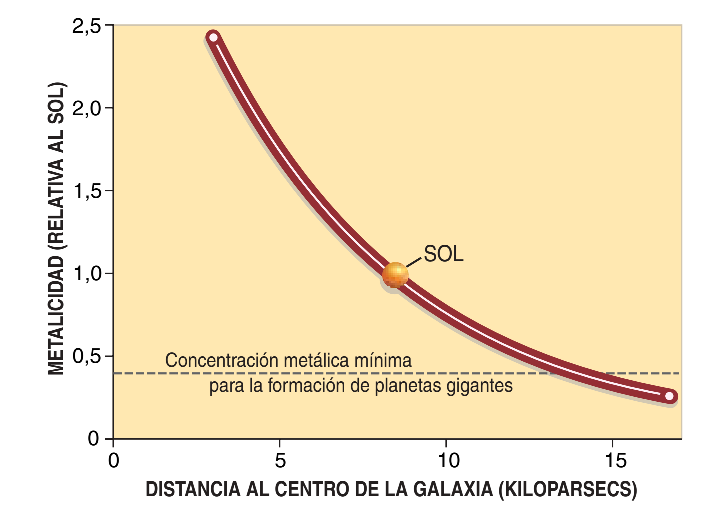
función esencial en el ciclo geoquímico que regula la cantidad de dióxido de carbono de nuestra atmósfera. Quizá los planetas terrestres que se estén ahora gestando serán planetas con una sola placa, como Venus y Marte. La ausencia de placas tectónicas en Venus fomenta las condiciones infernales que caracterizan el planeta. Verdad es que estamos lejos de entender por qué la geología de un planeta depende del flujo de su calor interno.

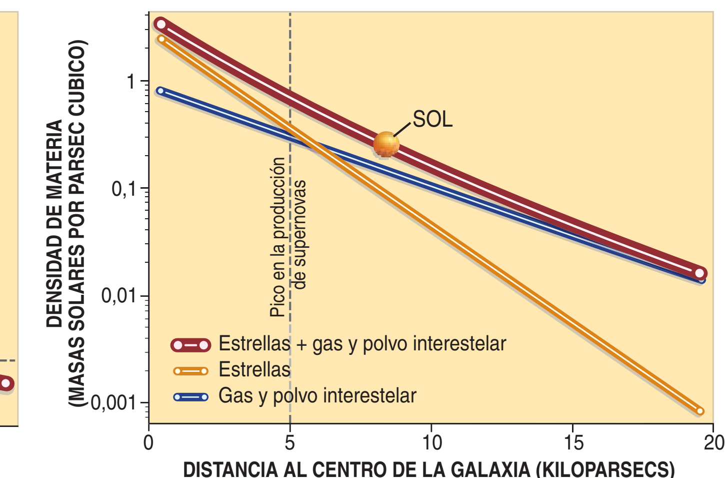
Peligro por doquier

Aun cuando pudiéramos reunir todos los átomos necesarios en el lugar y momentos adecuados para formar una Tierra, no sería quizás apropiado calificarla de “habitable”. Un planeta debe hallarse a buen resguardo de peligros amenazadores. Los resumiremos en dos categorías: impactos (de asteroides y cometas) y explosiones de radiación.

En nuestro sistema solar la frecuencia de los impactos de asteroides depende de la formación y órbita de Júpiter; el resto de la galaxia no ejerce un efecto directo. La amenaza cometaria, por su parte, es bastante sensible al entorno galáctico. Los cometas residen en dos grandes reservas, el cinturón de Kuiper (que comienza cerca de Neptuno) y la nube de Oort (que se extiende a mitad de camino hacia la estrella más cercana). Otras estrellas cuentan tal vez con estructuras similares. Las observaciones infrarrojas de las estrellas próximas indican que la mayoría están rodeadas de un exceso de polvo, lo que es coherente con la presencia de un cinturón de Kuiper. Más recientemente, se ha detectado vapor de agua alrededor de IRC+10216, una estrella muy evolucionada y luminosa, y se ha visto en ello una señal de evaporación de cometas. La caída de cometas podía estar tras los cambios en la estructura de algunas líneas espectrales de Beta Pictoris, una estrella joven con disco de polvo.

Al ser muy débil el ligamen de los cometas de la nube de Oort con el Sol, no cuesta mucho lanzarlos hacia los planetas interiores. Basta un empujón de las mareas galácticas, de las nubes moleculares gigantes o de las estrellas que pasan próximas. La frecuencia de tales perturbaciones depende de nuestra posición en la Vía Láctea. A medida que nos acercamos hacia el centro galáctico, aumenta la densidad de estrellas, por lo que registra mayor número de estrechas aproximaciones. Es más, un sistema planetario que se forme en una nube rica en metales contendrá a buen seguro más cometas que otro sistema nacido de una nube menos metálica. Por tanto, los sistemas planetarios del interior de la galaxia deben sufrir más impactos cometarios que el sistema solar.





5. LA UBICACION DE LA ZONA DE HABITABILIDAD viene determinada por el equilibrio entre el suministro de material para formar planetas y la naturaleza de los riesgos. El suministro disminuye con la distancia al centro galáctico (*izquierda*), mientras que la densidad de estrellas —fuente de explosiones estelares y choques, entre otros peligros— también mengua con la distancia (*derecha*). El compromiso aceptable se alcanza en el medio, aunque los astrónomos aún no se han puesto de acuerdo sobre el punto exacto del mismo.

Aunque la nube de Oort de ese sistema se agotaría antes, también se llenaría pronto de cometas provenientes de las reservas interiores.

La radiación de altas energías constituye un grave problema adicional en las regiones interiores de la galaxia. Hasta cierto punto, el campo magnético de un planeta lo defiende de los chorros de partículas; su capa de ozono puede reflejar la radiación electromagnética peligrosa. Pero una radiación energética alta puede ionizar la atmósfera y generar óxidos de nitrógeno en cantidades suficientes para agotar la capa de ozono. Esta radiación energética que continuamente estaría golpeando la atmósfera podría desencadenar una cascada letal de partículas secundarias.

Los episodios de radiación más "desagradables" son, en orden decreciente de duración, los estallidos de los núcleos activos de las galaxias, las supernovas y las explosiones de rayos gamma. El núcleo de la Vía Láctea es ahora poco activo; el agujero negro supermasivo del corazón de nuestra galaxia parece hallarse en estado latente. Pero las observaciones de otras galaxias sugieren que los agujeros negros centrales se activan al paso cercano de una estrella o un cúmulo de estrellas, que son atraídos a su trampa mortal. El resultado es una explosión de radiación de partículas y electromagnética de muy alta energía. La mayor parte de la radiación se emite en forma de chorro a lo largo del eje de rotación de la galaxia, pero muchas de las partículas cargadas viajan a lo largo de las líneas del campo magnético galáctico, ocupando un amplio volumen. El peor sitio donde refugiarse cuando ocurriera semejante explosión sería el bulbo. No sólo el nivel de radiación aumentaría de un modo notable, sino que, además, las estrellas tenderían allí a tomar órbitas muy inclinadas y elípticas que las aproximarían al núcleo o al chorro de radiación.

Las supernovas y las explosiones gamma redoblan su amenaza en el interior de la galaxia, por la sencilla razón de que existe allí una mayor concentración de estrellas. A tenor de las observaciones de los restos de supernovas, el máximo de sucesos supernova se produce a una distancia que es el 60 % de la distancia del Sol al centro galáctico, donde abundan 1,6 veces más. Se desconoce el peligro atribuible a las explosiones en rayos gamma; los astrónomos no saben qué mecanismos desencadenan estas explosiones descomunales o cuán colimada se emite la radiación ahí producida. Podemos considerarnos muy afortunados al haber evitado hasta ahora un rayo tan mortífero.

La radiación estelar también puede sofocar la vida en la propia cuna. Las estrellas de tipo solar no nacen aisladas; a menudo están rodeadas de estrellas de masa mayor y de otras de menos masa. Los niveles altos de radiación ultravioleta que emiten las estrellas más masivas erosionan los discos circumestelares, reduciendo así las probabilidades de formar planetas gigantes. De acuerdo con los cálculos realizados por el equipo que encabeza John Bally, de la Universidad de Colorado en Boulder, sólo un 10 % de las estrellas se hallan exentas de este efecto abrasivo, lo que podría explicar por qué apenas un 3 % de las estrellas más o menos de tipo solar tienen planetas gigantes.

Todos estos peligros conducen a una zona habitable bastante ancha con unas fronteras difusas. Ahora bien, si se incluye, como requisito adicional, la proximidad al círculo de corrotación, entonces la ZHG se estrecha. Por círculo de corrotación se entiende el lugar donde el período orbital de una estrella se iguala con el período de rotación del brazo espiral de la galaxia. Cuando una estrella orbita en el círculo de corrotación, o muy cerca del mismo, se hace

menos frecuente el paso de los brazos espirales. Se tardará más en cruzar un brazo espiral, aunque lo realmente importante es el período largo entre cruces. Las mediciones recientes de la dinámica de las estrellas próximas al Sol indican que el astro se mueve muy cerca del círculo de corrotación. Por hermosos que parezcan los brazos espirales, conviene apreciarlos desde lejos: la intensa formación estelar y las nubes moleculares gigantes que hay dentro de los brazos multiplican los riesgos para los organismos.

La paradoja perdida

Queda mucho camino por recorrer en el conocimiento de la ZHG. Los estudios continuos de cometas, núcleos galácticos, supernovas, explosiones en rayos gamma y dinámica estelar ayudarán a perfilar mejor cuanto encierra un obstáculo para la vida. Pero tenemos las grandes líneas del cuadro. Las regiones internas de la galaxia padecen inestabilidades orbitales, estallidos de radiación y perturbaciones cometarias. Las regiones exteriores resultan más seguras, aunque debido a una menor metalicidad, los planetas terrestres son allí menores.

La ZHG aparece como un anillo en el disco situado a una distancia similar a la del Sol. La ZHG es un concepto probabilístico. Aunque no todos los planetas incluidos en la zona son habitables, ni estériles todos los planetas a extramuros de la misma, la probabilidad de vida es mucho mayor en su seno. La ZHG se extiende lentamente hacia fuera a medida que el gas interestelar alcanza una metalicidad solar.

La noción de ZHG orienta la búsqueda de vida extraterrestre. Puede identificar los lugares de mayor probabilidad de aparición de formas complejas de vida; y, en correspondencia, hacia allí deben los investigadores dirigir sus trabajos. Se puede ya afirmar, con cierto grado de confianza, que no vale la pena entretenerse en los cúmulos globulares, el disco exterior de la galaxia o el centro galáctico.

El concepto de ZHG incide en el debate en torno a la paradoja de Fermi, según la cual si nuestra galaxia fuera prolífica en civilizaciones, tendríamos indicios de su existencia y, puesto que no los hay, lo más seguro es que estemos solos. Contra tal conclusión se ha esgrimido la posibilidad de que los seres extraterrestres no quisieran abandonar su hogar, ni enviar señales al espacio que revelaran su presencia. Ahora bien, si nuestra exposición de la ZHG va bien encaminada, vivimos en una región muy confortable de la Vía Láctea. Cualquier civilización que rastreara el cielo en busca de un nuevo mundo, incluiría sin duda el sistema solar en su lista. La teoría de la ZHG también cercena la idea de quienes aducen la inmensidad de la galaxia: los exploradores interestelares podrían haber pasado de largo. La ZHG, aunque extensa, sólo es una parte de la galaxia; cualquier viajero galáctico tendería a vagar alrededor del anillo más que a aventurarse por el interior de la galaxia.

A mayor abundamiento, la noción de ZHG restringe la habitabilidad no sólo en el espacio, sino también en el tiempo. La Vía Láctea estuvo repleta de supernovas y contaba con un núcleo activo. Sólo en los últimos 5000 millones de años aparecieron las condiciones para posibles civilizaciones. La metalicidad un poco alta del Sol probablemente nos diera un empujón. De ese modo, el concepto de la ZHG podría aportar una solución parcial a la paradoja de Fermi: la vida compleja es tan escasa y aislada, que nos encontramos solos. Evidentemente, esa conclusión sólo se predica de la vida compleja; los microorganismos, en su elementalidad, podrían resistir entornos muy dispares.

El universo parece incluso más desolador que nuestra galaxia. Aproximadamente el 80 % de las estrellas del universo local residen en galaxias que brillan menos que la Vía Láctea. Puesto que la metalicidad media de una galaxia se escala con su luminosidad, podría haber galaxias enteras que carecieran de planetas del tamaño de la Tierra. Debe considerarse asimismo la dinámica de las estrellas en el interior galáctico. Las estrellas de las galaxias elípticas giran en órbitas aleatorias y, por tanto, podrían frecuentar las peligrosas regiones centrales. En muchos sentidos, la Vía Láctea es sorprendentemente hospitalaria: una galaxia de disco con órbitas ordenadas, con poca actividad amenazadora y abundante en metales. No permanecerá siempre así. Se estima que la galaxia Andrómeda chocará con la Vía Láctea dentro de unos 3000 millones de años. Este suceso sacará de sus órbitas regulares a las estrellas del disco. Podría también suministrar combustible al agujero negro central, activándolo, con consecuencias desastrosas para los habitantes de la Tierra.

Bibliografía complementaria

GALACTIC CHEMICAL EVOLUTION: IMPLICATIONS FOR THE EXISTENCE OF HABITABLE PLANETS. Virginia Trimble en *Extraterrestrials: Where Are They?* Dirigido por M. H. Hart y B. Zuckerman. Cambridge University Press, 1995.

WORLDS WITHOUT END: THE EXPLORATION OF PLANETS KNOWN AND UNKNOWN. John S. Lewis. Perseus Book, 1998.

DESTINY OR CHANCE: OUR SOLAR SYSTEM AND ITS PLACE IN THE COSMOS. Stuart R. Taylor. Cambridge University Press, 1998.

RARE EARTH: WHY COMPLEX LIFE IS UNCOMMON IN THE UNIVERSE. Peter D. Ward y Donald Brownlee. Copernicus, 2000.

AN ESTIMATE OF THE AGE DISTRIBUTION OF TERRESTRIAL PLANETS IN THE UNIVERSE: QUANTIFYING METALLICITY AS A SELECTION EFFECT. Charles H. Lineweaver en *Icarus*, vol. 151, n.º 2, páginas 307-313; 1 de junio de 2001.

THE GALACTIC HABITABLE ZONE: GALACTIC CHEMICAL EVOLUTION. Guillermo González, Donald Brownlee y Peter D. Ward en *Icarus*, vol. 152, n.º 1, páginas 185-200; 1 de julio de 2001.

Deltas de zonas habitadas

Si se produjera un gran huracán que afectara a Nueva Orleans, la ciudad quedaría sumergida bajo seis metros de agua, con miles de pérdidas humanas. Para conjurar el peligro, deben emprenderse gigantescas obras de ingeniería que transformen el sudeste de Luisiana

Mark Fischetti

Nueva Orleans es un desastre anunciado. La ciudad está por debajo del nivel del mar en una depresión flanqueada por diques que la limitan al norte con el lago Pontchartrain y al sur y al oeste con el río Mississippi. Por culpa de una desgraciada confluencia de factores está hundiéndose más, con lo que el peligro de que se inunde aumenta, incluso con tormentas medias.

El delta del Mississippi, muy bajo, que se interpone entre la ciudad y el golfo, está desapareciendo a pasos agigantados. En un año habrán desaparecido otros 70 u 80 kilómetros cuadrados de sus marismas. Cada pérdida ofrece a las crecidas de las tormentas un camino más despejado para extenderse por el delta, verterse en la depresión y atrapar a un millón de personas en ella y otro millón de las localidades que la circundan. Sería imposible una evacuación general de la población porque la crecida cortaría las pocas vías de escape. Los modelos informáticos de las trayectorias posibles de las tormentas realizados en la Universidad estatal de Luisiana (UEL) cifran en más de cien mil las bajas.



Tarde o temprano la amenaza del huracán se cumplirá. No hay año en que no pase alguno cerca. En 1965, el huracán Betsy dejó partes de la ciudad bajo dos metros y medio de agua. El monstruoso Andrew, de 1992, estuvo a sólo 160 kilómetros. En 1998, Georges se desvió hacia el este en el último momento, pero aun así causó daños por valor de miles de millones de euros.

De la vulnerabilidad del enclave tiene buena parte de culpa la actividad humana: construcción de diques en los ríos, drenaje de humedales, dragado de cauces y excavación de canales en las marismas. Pero si no se interviene con nuevas obras, el delta protector habrá desaparecido para el 2090. La ciudad hundida estaría asentada directamente en el mar: en el mejor de los casos, una Venecia en apuros, en el peor, una Atlántida moderna.

A las pérdidas humanas que comportaría una Nueva Orleans anegada, habría que añadir los perjuicios económicos y el desastre ambiental. La costa de Luisiana produce un tercio del marisco de Estados Unidos, un quinto del petróleo y un cuarto de gas natural; alberga un 40 % de sus humedales costeros y es el lugar de invernada de un 70 % de sus aves acuáticas migratorias. El mayor puerto de la nación se extiende desde Nueva Orleans hasta Baton Rouge.

La conservación del delta podría servir de banco de pruebas para Estados Unidos y para el resto del mundo. Las marismas desaparecen de la costa este norteamericana, los estados del Golfo, la bahía de San Francisco y el estuario del río Columbia; en muy buena medida, por las mismas razones que las de Luisiana. Hay partes de Houston que se hunden más deprisa que Nueva Orleans. Los principales deltas del mundo —del delta del Orinoco en Venezuela al del Nilo en Egipto o al del Mekong en Vietnam— atraviesan la misma delicada situación que experimentaba, cien o doscientos años atrás, el delta del Mississippi.

1. EL OCEANO ha invadido una casa hoy abandonada de las islas Dernières, una isla de barrera que antes protegía el delta del Mississippi contra las incursiones del mar y que ahora está desapareciendo.



2. LOS CIPRESES de las ciénagas se mueren desde las raíces al entrar el agua salada. Las ciénagas se erosionan entonces y dejan que las aguas del golfo avancen aún más tierra adentro.

Las lecciones de Nueva Orleans podrían ayudar a que se establecieran unos criterios sólidos para el desarrollo seguro de esas zonas. El estado de Luisiana podría exportar técnicas de recuperación a todo el mundo. En Europa los deltas del Rin, el Ródano y el Po están perdiendo terreno. Además, si el nivel del mar sube por el calentamiento global en los próximos cien años, numerosas ciudades costeras habrán de tomar medidas de protección parecidas a las propuestas para Luisiana.

El delta

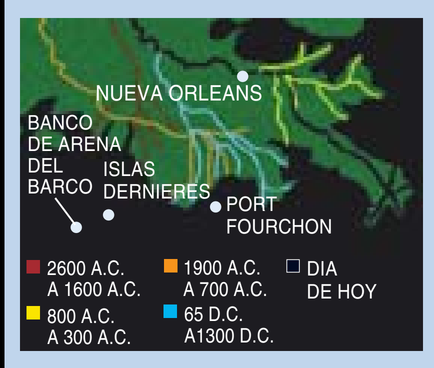
El Mississippi ha construido la llanura del delta que forma el sudeste de Luisiana. Deposita, cada año, grandes cantidades de sedi-

Hundirse hasta perderse de vista

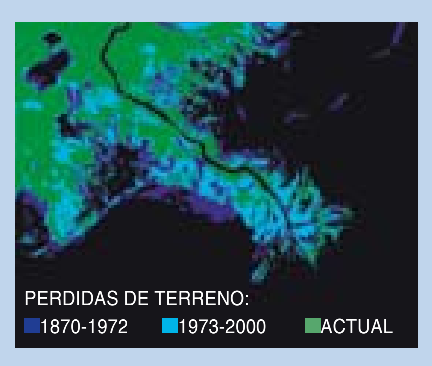
La actividad humana ha acelerado la velocidad a la que se pierde suelo en el sudeste de Luisiana, al restringir ciertos procesos naturales y propiciar el hundimiento natural del delta. Ya ahora, vastas partes de la región están poco más o menos a un metro del nivel del mar, y cada día desaparecen 24 hectáreas más. A este paso Nueva Orleans quedará expuesta al mar abierto en 2090.



EL SUDESTE DE LUISIANA es un valioso caso de prueba para los humedales costeros que están desapareciendo.



COMO CUALQUIER RIO, el poderoso Mississippi cambia de curso con el tiempo. A lo largo de los últimos 4600 años ha construido cuatro deltas distintos depositando grandes cantidades de sedimentos cada año con las inundaciones de primavera.



LOS DIQUES agravan la pérdida de terreno al embridar el río desde el norte de Luisiana hasta el golfo de México y cortar el aporte de sedimentos a las marismas circundantes. Entre 1932 y 1990 el delta perdió más de 2500 kilómetros cuadrados de terreno.

RIO MISSISSIPPI

LAGO PONTCHARTRAIN

NUEVA ORLEANS

DIQUE

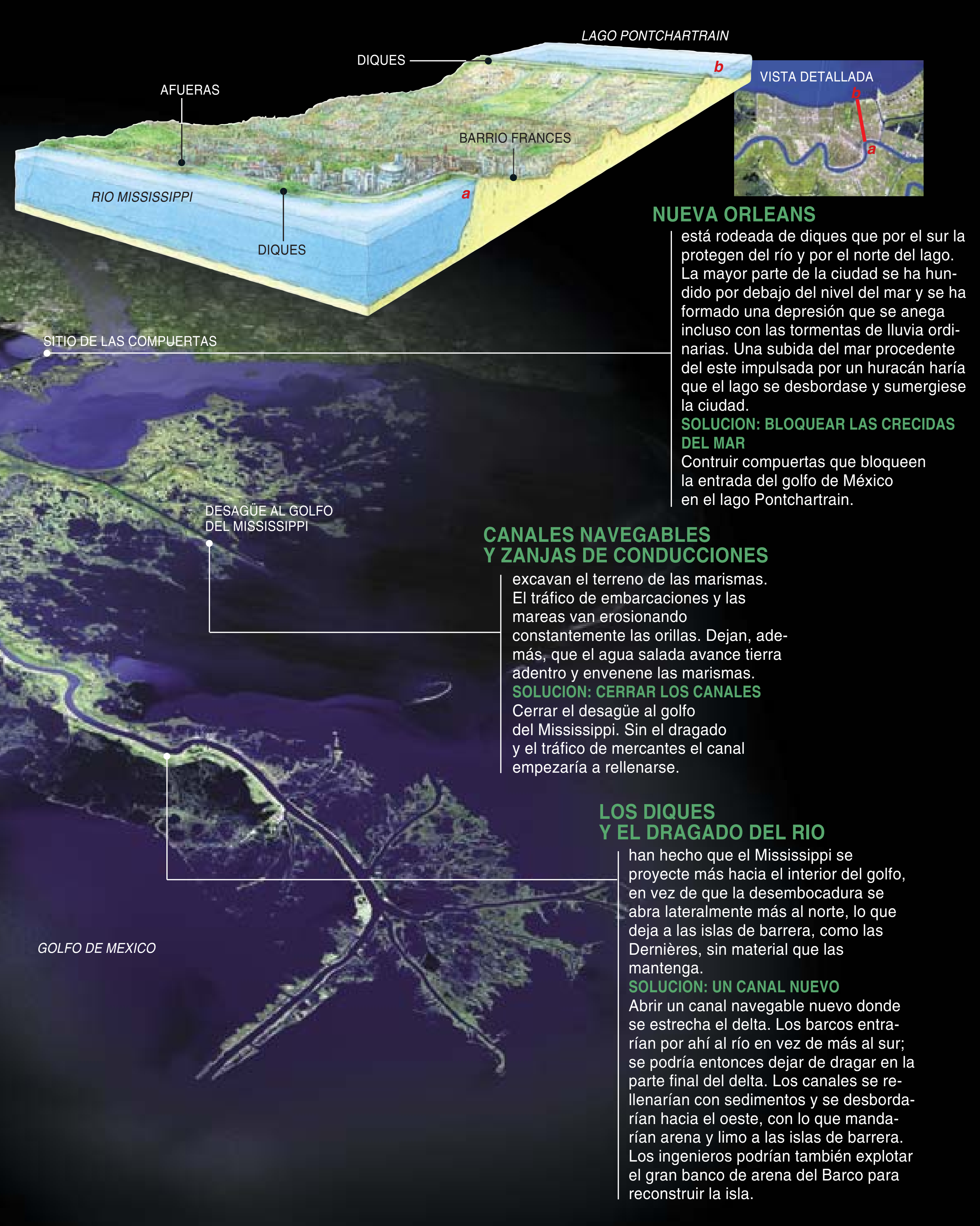
PORT
FOURCHON

ISLAS DERNIERES
Y BANCO DE ARENA
DEL BARCO

LOS DIQUES

inhiben la capacidad natural del río de mantener las marismas con sedimentos y agua dulce durante las inundaciones de primavera. Sin ese aporte, las marismas se hunden y erosionan y el agua del mar avanza tierra adentro; así aumenta la salinidad de las aguas de la marisma y se mueren los árboles y herbazales protectores contra la erosión.

SOLUCION: RECONSTRUIR LAS MARISMAS
Abrir uno o más canales a través del dique del río por la orilla sur y construir compuertas de control que dejen salir el agua dulce y los sedimentos para que se extiendan por marismas seleccionadas hacia el golfo de México.


LAGO PONTCHARTRAIN
DIQUES
AFUERAS
b
VISTA DETALLADA
b
a
BARRIO FRANCES
RIO MISSISSIPPI
a
DIQUES
NUEVA ORLEANS
está rodeada de diques que por el sur la protegen del río y por el norte del lago. La mayor parte de la ciudad se ha hundido por debajo del nivel del mar y se ha formado una depresión que se anega incluso con las tormentas de lluvia ordinarias. Una subida del mar procedente del este impulsada por un huracán haría que el lago se desbordase y sumergiese la ciudad.
SOLUCION: BLOQUEAR LAS CRECIDAS DEL MAR
Contruir compuertas que bloqueen la entrada del golfo de México en el lago Pontchartrain.
SITIO DE LAS COMPUERTAS
DESAGÜE AL GOLFO DEL MISSISSIPPI
CANALES NAVEGABLES Y ZANJAS DE CONDUCCIONES
excavan el terreno de las marismas. El tráfico de embarcaciones y las mareas van erosionando constantemente las orillas. Dejan, además, que el agua salada avance tierra adentro y envenene las marismas.
SOLUCION: CERRAR LOS CANALES
Cerrar el desagüe al golfo del Mississippi. Sin el dragado y el tráfico de mercantes el canal empezaría a rellenarse.
LOS DIQUES Y EL DRAGADO DEL RIO
han hecho que el Mississippi se proyecte más hacia el interior del golfo, en vez de que la desembocadura se abra lateralmente más al norte, lo que deja a las islas de barrera, como las Dernières, sin material que las mantenga.
SOLUCION: UN CANAL NUEVO
Abrir un canal navegable nuevo donde se estrecha el delta. Los barcos entrarían por ahí al río en vez de más al sur; se podría entonces dejar de dragar en la parte final del delta. Los canales se rellenarían con sedimentos y se desbordarían hacia el oeste, con lo que mandarían arena y limo a las islas de barrera. Los ingenieros podrían también explotar el gran banco de arena del Barco para reconstruir la isla.
GOLFO DE MEXICO

mentos con las inundaciones de primavera. Aunque los limos y arenas se comprimían al irse secando bajo su propio peso y se hundían un poco, la siguiente inundación los reconstruía, pero desde 1879 el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos ha venido levantando diques y encauzando el río para que las inundaciones no perjudiquen a las poblaciones y a los negocios. El río está ahora embridado desde el norte de Luisiana hasta el golfo y el suministro de sedimentos se ha cortado. Resultado de esas obras, la llanura ha quedado por debajo del nivel de un mar que avanza.

Al desaparecer los humedales se desvanece el parapeto que protegía a Nueva Orleans del mar. Una crecida impulsada por un huracán puede llegar a más de seis metros de altura, pero cada seis o siete kilómetros de marisma absorben agua como para que descienda treinta centímetros.

La marisma de los aledaños de Nueva Orleans es todavía una vibrante esponja, una mezcla siempre cambiante de aguas dulces someras, carrizos y cipreses de ciénaga de los que cuelga un briófito que los lugareños llaman musgo de España. A medio camino hacia el golfo, la esponja rebosa agua. Las carreteras, aisladas y tendidas sobre terraplenes de piedra, atraviesan los bajíos, dejando atrás arboledas desnudas y muertas, herbazales agostados y extensiones de agua.

En Port Fourchon, donde el mar abierto del golfo sustituye a la marisma, el hundimiento y la erosión progresan implacables. Sólo una carretera, que muere en edificios de hierro destartalados donde convergen las tuberías del petróleo y del gas natural procedentes de cientos de pozos submarinos. Las plataformas dibujan un sombrío bosque de acero que sale del mar. Para transportar el combustible las compañías han abierto cientos de canales navegables y zanjas de tuberías a través de las marismas costeras y del interior. Cada excavación retira tierra y el tráfico de las embarcaciones y las mareas erosionan sin cesar las orillas. Una playa media estadounidense pierde por la erosión unos sesenta centímetros al año, pero Port Fourchon pierde de doce a quince metros; en ninguna otra parte del país se pierde tanto. La red de canales permite además que el agua salada entre con facilidad en las marismas interiores, con lo que la salinidad de éstas aumenta y los herbazales y los bosques de pantano se mueren desde las raíces. No queda vegetación que proteja de la devastación del viento y el agua a las marismas. Según un estudio de Shea Penland, de la Universidad de Nueva Orleans, las actividades de las petroquímicas han causado un tercio de las pérdidas de terreno del delta.

Islas de barrera

Con la marisma sumergida, la única defensa que le queda al delta son unas cuantas islas de barrera. También se están desmoronando y a mayor velocidad que en otras zonas de Estados Unidos. Cien años atrás, formaban parte de la línea de costa de la región. Con sus mangles negros, frenaban las olas del océano, cortaban las crecidas cuando había tormentas y retenían el agua salada.

Antes salían al año millones de toneladas de sedimentos por la desembocadura del Mississippi; las corrientes paralelas a la costa las arrastraban hacia las islas y se reconstruía lo que las mareas se habían llevado. Pero, en parte por los diques y drenados que impiden que los últimos kilómetros del río describan sus meandros naturales, la desembocadura se ha adentrado en la plataforma continental. Los sedimentos se precipitan por el borde del talud continental.

Según Cliff Mugnier, de la Universidad de Luisiana, el lecho del delta está compuesto por capas de fango —turba empapada de unos cientos de metros— creadas por siglos de inundaciones. A medida que el Cuerpo de Ingenieros fue levantando diques, las ciudades y la industria drenaron zonas de marisma consideradas hasta entonces baldías. Al cesar las inundaciones y drenarse las aguas superficiales, bajó la capa freática; las capas superiores de fango se secaron, compactaron y subsidieron, con lo que la ciudad aceleró su hundimiento bajo el nivel del mar.

Con el rebaje, la depresión se anegaría en episodios tormentosos rutinarios. Por eso el Cuerpo de Ingenieros, en colaboración con la Junta de Aguas y Residuos de la ciudad, se puso a excavar un laberinto de canales que recogiesen el agua de la lluvia. Sólo podía ésta verterse al lago Pontchartrain, pero como su elevación media es de treinta centímetros hubo que construir estaciones de bombeo elevadoras.

Las bombas cumplen otra función importantísima. Los canales son, en esencia, zanjas. Es decir, rezuman en ellos las aguas subterráneas de los suelos húmedos. Si están llenos, no pueden absorber el agua de una tormenta. Por eso, la ciudad pone en marcha con re-

Resumen/Deltas de zonas habitadas

- La zona de Nueva Orleans aloja a más de dos millones de personas.
- El delta del Mississippi es un ejemplo ideal de los problemas que amenazan a los deltas, humedales costeros y ciudades al borde del mar de todo el mundo.
- El sur de Luisiana produce un tercio del marisco, un quinto del petróleo y un cuarto del gas natural de Estados Unidos.
- La costa del estado posee un 40 % de los humedales costeros de Estados Unidos y ofrece un lugar de invernada al 70 % de sus aves acuáticas migratorias.
- El conjunto de instalaciones a lo largo del Mississippi, de Nueva Orleans a Baton Rouge, constituye el mayor puerto de Estados Unidos.

gularidad las bombas para sacar esas filtraciones de los canales, sólo que así se extrae todavía más agua del subsuelo, que se seca y hunde más. Cuanto más se hunde, más se inunda. Mientras, las calles y los senderos de entrada a las casas y los patios ceden, y las casas saltan por los aires porque se rompen las conducciones del gas natural. Por si fuera poco, las “parroquias” o barrios suburbanos, de población creciente, abren más canales de avenamiento.

Dificultades

No se puede detener el hundimiento del delta, ni minar los diques para que el río forme las inundaciones y meandros que le son característicos. No se puede porque se trata de una región habitada y de importantes recursos económicos en explotación. Las únicas soluciones realistas, coinciden la mayoría de los ingenieros y científicos, consisten en recuperar las marismas para que absorban los niveles elevados de las aguas y en volver a conectar las islas de barrera para cortar las crecidas y proteger del mar las marismas recuperadas.

Pero las coincidencias se limitan a las líneas generales. En la ejecución detallada discrepan. La UEL tiene sus modelos de las crecidas, el Cuerpo de Ingenieros otros. Si éste recriminaba la alarma de los universitarios acerca del desastre —la Luisiana costera habrá perdido para 2050 otros 2500 kilómetros cuadrados de marismas y ciénagas— como velados pretextos para recabar mayores subvenciones, la Academia replicaba que los ingenieros lo arreglan todo con bulldozers y hormigón. En el fuego cruzado, los dueños de criaderos y piscifactorías atribuyen a ambos la voluntad de arruinar sus negocios. Para enredar más la madeja, hay cinco agencias federales y seis estatales con jurisdicción sobre los humedales.

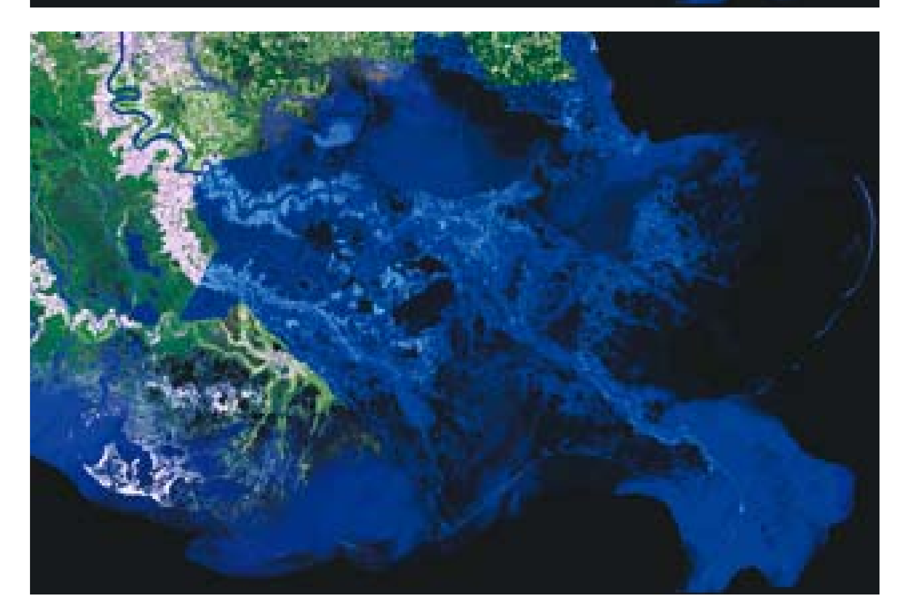
Un plan maestro

Pese a todo, desde hace tres años se cuenta con un plan conjunto elaborado por la oficina del gobernador, el Departamento de Recursos Naturales del estado de Luisiana, el Cuerpo de Ingenieros, la Agencia de Protección Ambiental, el Servicio de Pesca y Vida Salvaje y las 20 parroquias. El proyecto *Costa 2050*, así se llama, aborda la restauración integral de la Luisiana costera.

De acuerdo con el mismo, habría que derivar agua en varios puntos para recuperar las marismas en peligro. En cada uno de ellos el Cuerpo abriría un canal a través del dique del lado sur del río y construiría compuertas de control para que el agua dulce y los sedimentos en suspensión rie-

El desastre: el peor de los casos





3. LOS MODELOS INFORMATICOS de los investigadores de la Universidad estatal de Luisiana predicen que los vientos que girasen en sentido contrario a las agujas del reloj de un huracán lento de categoría 4 (es decir, con vientos de hasta 250 kilómetros por hora) que cruzara el golfo de México desde el sudoeste impulsarían una crecida del mar 50 kilómetros tierra adentro, justo hasta las puertas de Nueva Orleans. En lo más alto de la inundación el centro de la ciudad quedaría bajo más de seis metros de agua sólo unas 33 horas después de que los primeros vientos de la tormenta alcanzasen las islas de barrera del sur.

guen marismas escogidas en dirección al golfo. Habría que hallar una solución de compromiso con los criadores de ostras.

El segundo paso a dar sería reconstruir las islas de barrera con unos cuatrocientos millones de metros cúbicos de arena del Barco. Luego, el Cuerpo abriría un canal hacia la mitad de donde se estrecha el delta. Los cargueros podrían enfilar el río por ahí. El Cuerpo podría entonces dejar de dragar el extremo meridional del Mississippi. La desembocadura se llenaría de sedimentos y empezaría a desbordarse hacia el oeste, con lo que volvería a mandar arena y limo a las corrientes paralelas a la costa, que así podrían mantener a las islas de barrera.

Se podría integrar el plan del canal en el proyectado Puerto del Milenio, de nueva creación. Tendría más calado para los mercantes que el de Nueva Orleans y su canal principal, el Desagüe al Golfo del Mississippi (o MRGO), abierto en los años sesenta. El desagüe se ha erosionado —tenía antes 150 metros de ancho, ahora 600 en algunos lugares— y deja entrar un torrente incesante de agua salada que ha matado buena parte de la marisma que antes protegía el este de Nueva Orleans de las tormentas del golfo. Si se construyesen el canal o el Puerto del Milenio podría cerrarse el MRGO.

Debería taponarse el par de estrechos del borde oriental del lago Pontchartrain que lo conectan con el golfo. Podría pensarse en ponerles compuertas, a la manera en que los holandeses regulan el flujo del mar tierra adentro.

Si bien el proyecto parece el más ajustado al obrar de la naturaleza, no se halla libre de objeciones. Quizás el Mississippi no lleve suficientes sedimentos para alimentar múltiples ramales. Según investigaciones de Robert Meade, del Servicio Geológico de Estados Unidos, el aporte de sedimentos en suspensión es menos de la mitad del que era antes de 1953, esquilmado por las presas del curso medio del río.

El primer acto de *Costa 2050* empieza en el embalse de Davis, treinta kilómetros al sur de Nueva Orleans. La presa discurre paralela al dique meridional del río. A la mitad de su sección tiene unas compuertas de acero, que se abrirán y cerrarán para controlar el agua que dejen correr. El agua se verterá en una amplia franja de terreno que se ha despejado en la ciénaga y se extiende alrededor de kilómetro y medio hacia al sur, como si fuera un cauce somero que poco a poco se dispersará hasta convertirse en una marisma sin bordes. La estructura sacará hasta 300 metros cúbicos por segundo de agua del Mississippi, cuyo caudal total, pasada Nueva Orleans, está entre unos 5000 metros cúbicos por segundo durante las sequías y más de 28.000 cuando hay inundación. La cantidad vertida debería servir para que se conservasen 13.000 hectáreas de humedales, criaderos de ostras y pesquerías.

La restauración de la Luisiana costera protegería las industrias marisquera y mercante del país y su suministro de petróleo y gas natural. Salvaría además los mayores humedales de Estados Unidos. Y si no se hace nada el millón de personas que viven fuera de Nueva Orleans tendría que irse a vivir a otra parte. El otro millón que hay dentro de la depresión viviría en el fondo de un cráter que se hunde, rodeados por paredes cada vez más altas, atrapados en una ciudad en estado terminal que para seguir viva dependerá de que se bombee sin parar.

Bibliografía complementaria

COAST 2050: TOWARD A SUSTAINABLE COASTAL LOUISIANA. Louisiana Department of Natural Resources, 1998. Disponible en www.coast2050.gov/report.pdf.

HOLDING BACK THE SEA: THE STRUGGLE FOR AMERICA'S NATURAL LEGACY ON THE GULF COAST. Christopher Hallowell, HarperCollins, 2001.

TRANSFORMING NEW ORLEANS AND ITS ENVIRONS: CENTURY OF CHANGE. Dirigido por Craig E. Colten. Universidad de Pittsburgh Press, 2001.

Luz y evolución vegetal

En el curso de la evolución unas plantas se han adaptado a una vida sometida a radiaciones extremas y otras han desarrollado una notable capacidad para acomodarse a la luz del momento

Fernando Valladares

La luz es imprescindible para la vida en el planeta. En presencia de la misma, las plantas sintetizan compuestos orgánicos a partir del dióxido de carbono y agua, es decir, acometen el proceso de fotosíntesis. Pero la luz es muy heterogénea y cambiante. Con otras palabras, las plantas se hallan a menudo expuestas a radiaciones que distan de ser óptimas para la fotosíntesis.

Para salvar tamaño escollo, los vegetales han desarrollado en el curso de la evolución una serie de adaptaciones estructurales y fisiológicas que les permiten soportar y aprovechar fotosintéticamente radiaciones bajísimas —las que se dan en el sotobosque— o muy altas, típicas de un día de pleno sol. Además, para mejorar su rendimiento fotosintético las plantas pueden modificar su estructura y fisiología en función de la radiación disponible; es lo que se llama respuesta plástica del fenotipo o plasticidad fenotípica frente al ambiente lumínico. No todas las plantas tienen la misma plasticidad fenotípica, facultad que parece guardar relación con las características del medio donde medran.

La luz es, posiblemente, el recurso más variable de todos los que la planta requiere para su crecimiento. Varía en cantidad, calidad y direccionalidad. La propia frecuencia de las variaciones oscila entre fracciones de segundo y meses.

La interacción entre latitud y época del año explica los cambios lumínicos estacionales. En zonas templadas las plantas experimentan diferencias en el fotoperíodo de 8 a 12 horas entre invierno y verano, con una radiación total diaria en verano que decuplica la recibida en invierno. Las nubes pueden reducir mucho y de forma brusca la radiación que llega a las plantas. En un día nuboso con viento, la intensidad de la luz fotosintéticamente activa (PAR) puede experimentar en pocos minutos fluctuaciones de hasta dos órdenes de magnitud.

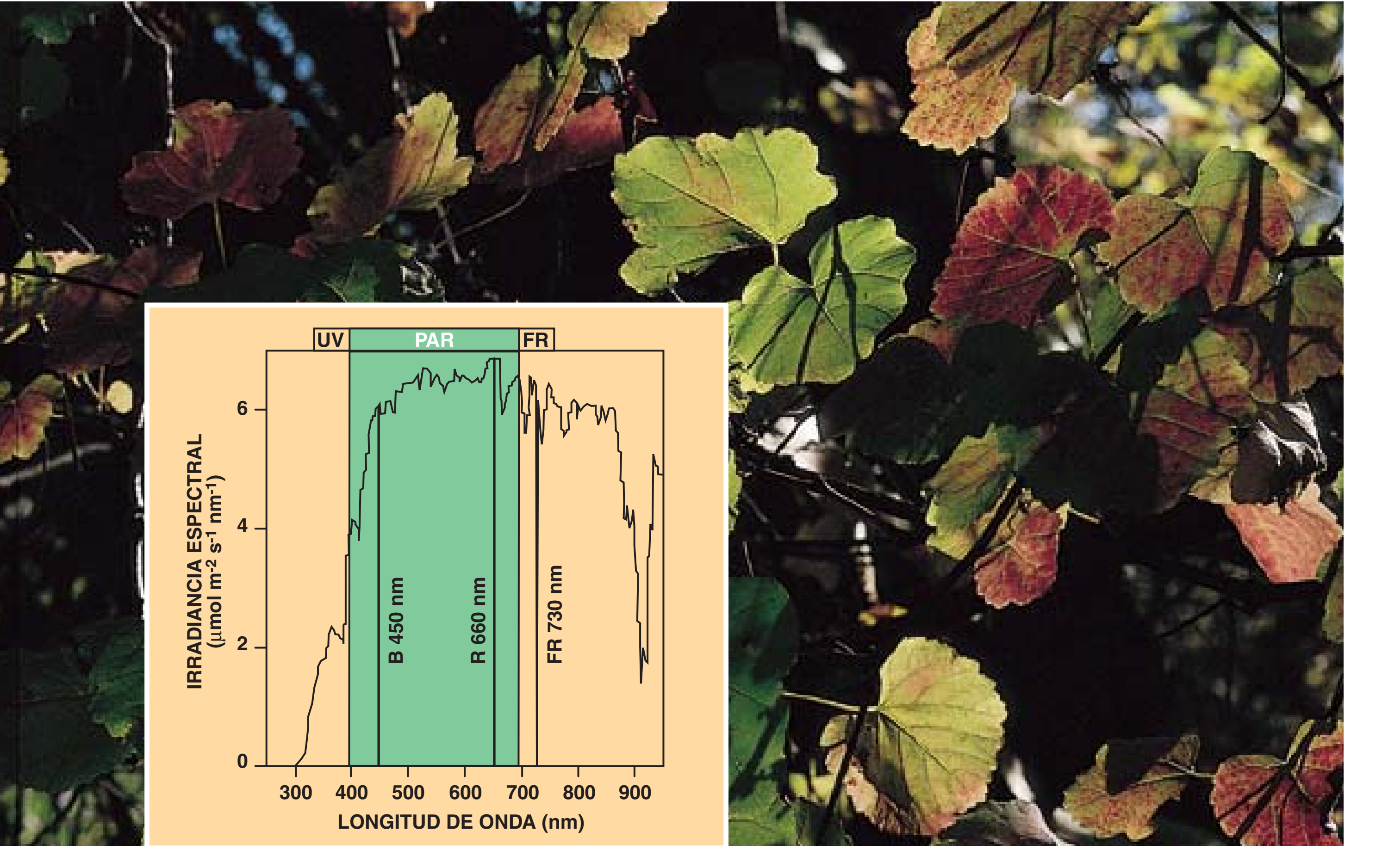
No obstante, el factor que más afecta a la radiación disponible por las plantas, además del ciclo diurno, es la presencia de otras plantas. La vegetación absorbe de un modo eficaz la radiación PAR. En los 3-5 primeros metros de la parte superior del dosel de un bosque maduro se absorbe el 90 % de la radiación PAR incidente. En estos primeros metros se sitúa aproximadamente un tercio del follaje total del dosel, por lo que los dos tercios restantes apenas disponen de un 10 % de la radiación PAR incidente. Las plantas pequeñas deben sobrevivir en dicho entorno con apenas un 1-5 % de la radiación fotosintéticamente activa. La vegetación arbórea genera no sólo este gradiente vertical de PAR, sino también una gran heterogeneidad espacial en la luz del suelo del bosque; en resumen, en distancias de pocos metros se pueden recibir radiaciones muy dispares, debido a las discontinuidades en el dosel forestal.

El viento, al agitar la vegetación, modifica la arquitectura y afecta a la cantidad de luz absorbida o recibida. Fijémonos en los álamos temblones (*Populus tremula* y *P. tremuloides*). Estas especies arbóreas presentan hojas unidas al tallo por un pecíolo largo y flexible, perpendicularmente aplanado al plano de la hoja, y así “tiemblan” con el viento. Las rápidas oscilaciones de las hojas de los álamos con el viento causan variaciones de alta frecuencia (de tres a cinco hertz) en la radiación PAR que se recibe por debajo de ellas. En general, cuanto mayor es la velocidad del viento, mayor es la radiación PAR que las hojas temblorosas dejan pasar. Gracias a ello puede utilizarse una misma cantidad de radiación PAR por más hojas, aumentando el rendimiento del árbol y de las plantas que viven debajo del mismo.

La vegetación afecta también a la calidad de la radiación disponible, es decir, a su espectro. Debido a su eficaz absorción de la luz fotosintéticamente activa, las plantas alteran la proporción entre

El autor

FERNANDO VALLADARES, es científico titular del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, ha estudiado la forma y la función de organismos fotosintéticos terrestres. Doctorado con premio extraordinario en la Universidad Complutense de Madrid, prosiguió su formación en la de California en Davis.



1. LAS HOJAS ABSORBEN EFICAZMENTE la radiación solar, en particular la fotosintéticamente activa (PAR). La región PAR queda entre la región del ultravioleta (UV) y del infrarrojo (FR). La figura muestra la irradiancia espectral típica de la luz solar directa a mediodía para un día despejado y una latitud templada. Tres fitocromos diferentes (B o azul, R o rojo, y FR o rojo lejano) sensibles a distintas longitudes de onda del espectro informan a la planta sobre su entorno lumínico. La luz solar que atraviesa el follaje tiene un espectro distintivo: la proporción entre rojo y rojo lejano es menor que a cielo abierto. Este cambio espectral, detectado por las plantas, desencadena cambios morfológicos y fisiológicos para escapar de la sombra de las plantas vecinas.

radiación en el rojo y radiación en el rojo lejano. La radiación en el rojo cae dentro del rango de luz fotosintéticamente activa, no así la radiación en el rojo lejano. Una disminución en la proporción rojo/rojo lejano de la radiación incidente provoca, en muchas especies, cambios importantes de morfología y función encaminados a evitar la competencia por la luz. Una de esas modificaciones se aprecia en la elongación del tallo.

El sotobosque

Para una planta o arbusto de pequeña talla, subsistir en el sotobosque de formaciones maduras significa sobrevivir con radiaciones PAR próximas al punto de compensación lumínico, expresión que designa el nivel de radiación en el que la tasa de fijación de carbono por fotosíntesis se compensa con la tasa de pérdida de carbono por respiración.

Pero en el sotobosque encontramos una notable diversidad de especies, sobre todo en zonas tropicales y templadas húmedas. ¿Cuáles son los mecanismos implicados en la supervivencia bajo radiaciones tan mínimas? ¿De qué modo se manifiestan en las distintas especies que coexisten en el sotobosque? Los mecanismos observados se reducen a dos tipos principales: estructurales o arquitecturales y fisiológicos.

Cada especie vegetal presenta una arquitectura característica, fruto de una evolución divergente en la que se han optimizado determinadas funciones (rápida ocupación del espacio, eficaz reproducción, alto aprovechamiento de la radiación, resistencia a perturbaciones mecánicas, etcétera) a expensas de otras, siempre dentro de las limitaciones biomecánicas, hídricas y genéticas propias del binomio especie-ambiente.

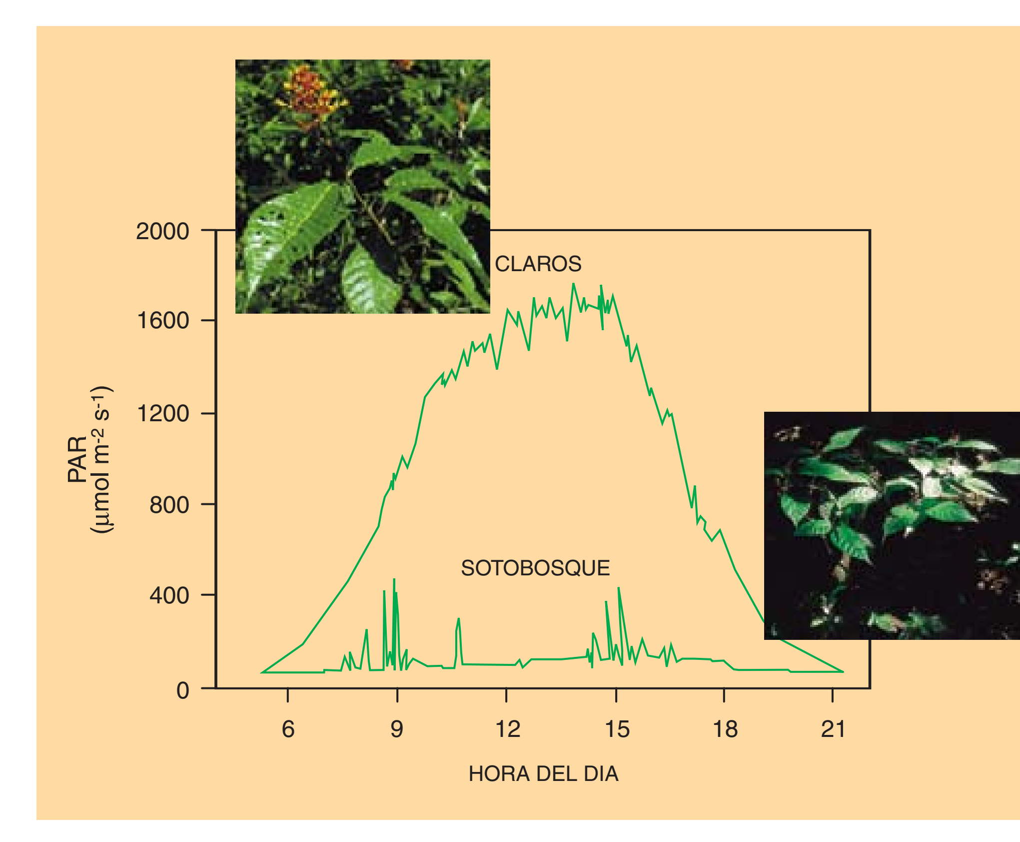
El problema de la captación de luz cuando ésta escasea se ha resuelto de manera muy dispar en el curso de la evolución. Ante las limitaciones de crecimiento que se imponen en sotobosques umbrosos, resulta decisiva la correcta distribución de recursos y biomasa entre las unidades funcionales de la planta. En la parte aérea del vegetal la biomasa se distribuye en hojas, responsables de la captación de luz y de su utilización fotosintética, y en tallos y pecíolos, encargados de conectar y sostener las superficies fotosintéticas, manteniéndolas en la orientación idónea.

En una comparación de 24 especies que convivían en el sotobosque de un bosque tropical lluvioso de Panamá se observó que la fracción de la biomasa aérea invertida en soporte oscilaba entre



2. DIVERSIDAD Y EVOLUCION EN EL SOTOBOSQUE. En el interior de la pluviselva tropical, la radiación lumínica disponible es hasta tres órdenes de magnitud inferior que en los claros. Lo que no obsta para que medre allí una notable riqueza de especies. En la isla panameña de Barro Colorado se observó que las arquitecturas de 24 especies que convivían en el sotobosque obtenían rendimientos muy similares en su absorción de la luz. La divergencia estructural, evidenciada en parámetros como la fracción de la biomasa que se invertía en estructuras de sostén (tallos y pecíolos), se tradujo en convergencia funcional (compárense los coeficientes de variación). Se llegó a esa conclusión cuando la fracción de la luz disponible que era absorbida por la planta se calculó mediante la reconstrucción tridimensional de la arquitectura de cada espécimen por ordenador (*figuras inferiores*).

3. LA LUZ DEL SOTOBOSQUE, aunque menos intensa y de distinto espectro que la de los claros, es, sin embargo, mucho más dinámica. Gracias a las discontinuidades del dosel forestal llegan al suelo del bosque breves pulsos de luz solar directa. Estos suponen un incremento de hasta dos órdenes de magnitud en la radiación disponible. Son muy breves. En promedio, apenas duran 10 segundos en bosques maduros. Pero representan entre el 40 y el 80 % de la radiación total disponible, por lo que muchas especies típicas de sotobosque presentan una fotosíntesis dinámica de respuesta rápida, capaz de aprovechar esos pulsos de luz breves e impredecibles mejor que sus congéneres de zonas iluminadas.



apenas un 5 % de la biomasa aérea total en especies de bromeliáceas hasta más de un 80 % en el caso de arbustos del género *Hybanthus*. Las especies comparadas diferían en la forma de crecimiento (herbáceas, arbustos, trepadoras), grupo filogenético y tamaño medio de la planta entera y hojas; este último factor variaba desde pocos centímetros hasta algunos metros. El triple criterio de diferencia explicaba las notables divergencias en la distribución de la biomasa aérea.

Sin embargo, cuando se reconstruyó por ordenador la estructura tridimensional de la copa de las plantas cotejadas y se simuló la absorción de radiación en diversos ejemplares de cada especie, se descubrió que la eficiencia de las arquitecturas de especies tan distintas era muy similar. A excepción de las plantas trepadoras, que mostraron un rendimiento muy bajo, el resto absorbía entre un 55 % y un 75 % de la radiación PAR disponible.

Con independencia del tamaño o forma de la planta, los ejemplares estudiados evitaban el autosombreado (solapamiento entre distintas hojas) y orientaban con precisión el follaje hacia las zonas luminosas del dosel. El estudio reveló, pues, una notable convergencia funcional de arquitecturas distintas; o lo que era lo mismo, aparecían muchas soluciones estructurales igualmente eficaces para el problema de la escasez lumínica.

Mas, aunque pobre, la luz del sotobosque es muy dinámica. Las discontinuidades en el dosel dejan pasar radiación solar directa durante breves períodos de tiempo, con la generación consiguiente de fluctuaciones irregulares de hasta dos órdenes de magnitud en la radiación PAR que llega al sotobosque. Estos "pulsos" de sol duran, en promedio, de 3 a 15 segundos, según las características del dosel. Pueden llegar a representar un 80 % de toda la luz que se recibe en el sotobosque. Por tanto, suponen un recurso valioso en la penumbra.

Mas ocurre que el proceso de fotosíntesis demora su reacción ante el estímulo lumínico. No responde instantáneamente a incrementos de radiación imprevisibles y bruscos. (Se llama inducción al tiempo de reacción de la fotosíntesis ante un incremento rápido de radiación.) Aunque las principales enzimas implicadas en el proceso intervienen en fracciones de segundo o a los pocos segundos, los estomas tardan minutos en abrirse. Así se explica que una hoja que ha estado expuesta a radiaciones relativamente bajas y, por tanto, sus estomas persisten cerrados y sus enzimas sin inducir, pueda aprovechar mucho peor un pulso de sol de unos segundos de duración que otra hoja que ha estado ya expuesta a altos niveles de radiación PAR antes del pulso de sol.

No obstante, una vez activada, la maquinaria fotosintética puede seguir fijando carbono en oscuridad durante unos segundos, fenómeno que se conoce como efecto postiluminación. Si los pulsos de luz son breves, se suceden muy deprisa y no se pierde la inducción de la fotosíntesis, la ganancia de carbono durante estos pulsos puede superar la que obtendría una hoja cuya actividad fotosintética se activara y desactivara instantáneamente con la luz. En estas condiciones, las desventajas del tiempo de inducción quedan compensadas con los beneficios del efecto postiluminación.

Por comparaciones entre plantas adaptadas a la vida en el sotobosque y plantas de claros y zonas bien iluminadas, se sabe que las primeras alcanzan unas tasas máximas de fotosíntesis menores

que las segundas; con las tasas de respiración, ocurre lo contrario. De ello se desprende que las plantas de sotobosque extraen un menor rendimiento fotosintético de la luz solar intensa y continua propia de los claros del bosque, si bien han minimizado los gastos de mantenimiento reduciendo las pérdidas de carbono por respiración.

Pero han desarrollado una capacidad extraordinaria para aprovechar los pulsos intermitentes de sol. Los estudios de campo y de laboratorio han revelado que ciertas plantas de sotobosque presentan una inducción más rápida y perdurable en la sombra, tras quedar expuestas a un pulso de sol, que sus homólogas de zonas bien iluminadas.

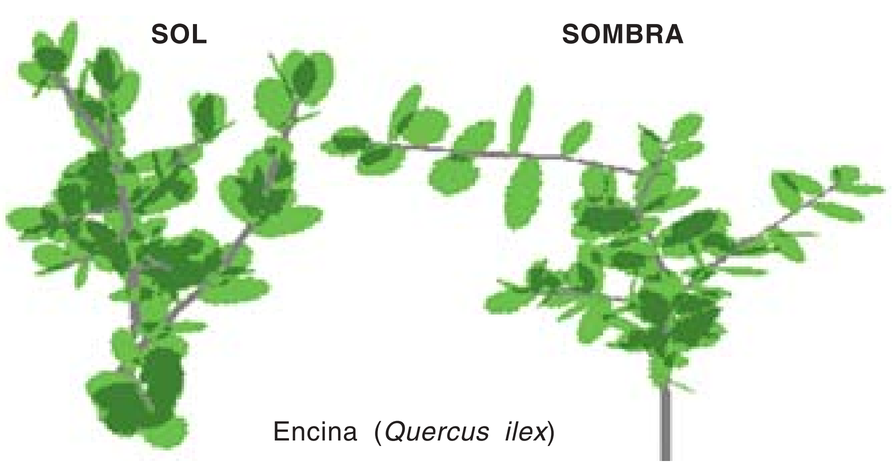
Las adaptaciones fisiológicas para aprovechar una luz fluctuante aumentan el rendimiento fotosintético del sotobosque. No obstante, el éxito de esta adaptación depende de la eficiencia con que la planta evita el autosombreado. Con otras palabras, la fisiología reclama una adecuada arquitectura de la planta para maximizar su eficacia.

La radiación intensa

Muy pocas veces puede sacársele el máximo partido fotosintético a la luz solar directa. Por una razón obvia: suele ir acompañada de temperaturas extremas o déficits hídricos, que limitan la actividad fotosintética. Los ambientes donde se han registrado los máximos de radiación y los promedios más elevados de radiación diaria acumulada son los desiertos, cálidos o helados. En ellos convergen, de una manera crónica, radiaciones intensas y factores ambientales adversos. También en las latitudes templadas y tropicales pueden darse fenómenos estacionales o diarios desfavorables; en esas circunstancias, lejos de aprovecharse fotosintéticamente las radiaciones solares intensas, constituyen un factor de estrés adicional.

Dos son los peligros principales derivados de tales radiaciones: el sobrecalentamiento de las hojas y el daño fotoquímico de la maquinaria fotosintética. Se corre el primero cuando la temperatura del aire es alta y la transpiración foliar se halla mermada por déficit hídrico. Puede producirse un daño fotoquímico si la fotosíntesis se encuentra limitada por algún factor interno o externo y no se desvía la radiación incidente antes de que llegue a los fotosistemas. Estos sistemas son los responsables de canalizar los fotones hacia las rutas bioquímicas implicadas en la fijación del carbono.

La hiedra (*Hedera helix*) crece en lugares generalmente poco iluminados, con frecuencia sobre los troncos y ramas de los árboles. Cuando el árbol donde trepa es deciduo y la latitud templada, la radiación solar del invierno constituye un peligro potencial. Entre los meses de diciembre y febrero la radiación PAR que llegó a unas hiedras que crecían sobre árboles deciduos de Innsbruck aumentó casi dos órdenes de



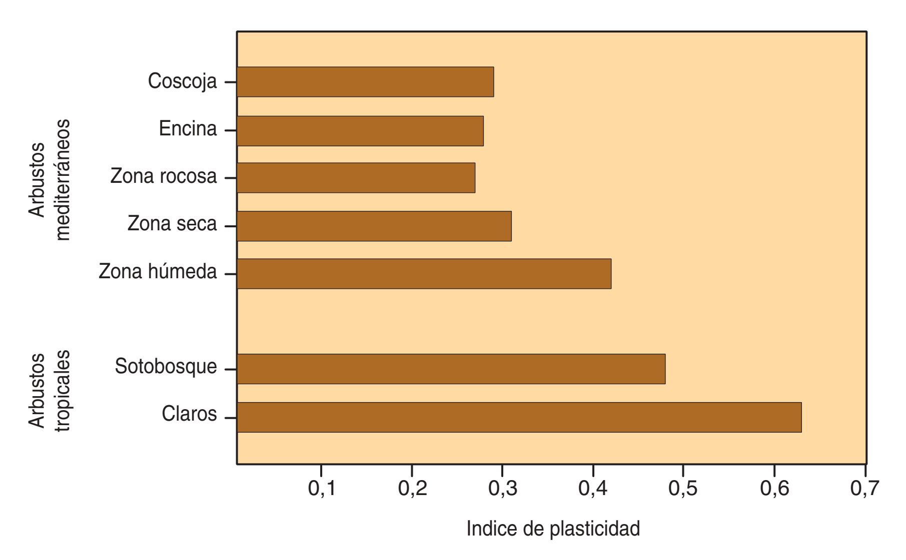
Encina (*Quercus ilex*)





Toyon (*Heteromeles arbutifolia*)

4. LA PLASTICIDAD FENOTIPICA explica por qué una misma especie presenta distinto aspecto cuando crece al sol que cuando crece a la sombra. Su genotipo produce fenotipos diferentes a instancias del medio. Los árboles y arbustos de clima mediterráneo, como la encina europea y el toyon de California, muestran fenotipos bastante distintos en el sol y en la sombra. Las plantas de sombra presentan hojas y tallos más horizontales y espaciados entre sí; se evita el autosombreado y aumenta la eficiencia con que las hojas absorben la luz. A pleno sol, sobre todo en zonas áridas, la radiación es excesiva para la fotosíntesis. En estos casos la luz se convierte en un factor de estrés adicional que compromete la supervivencia de las plantas que no estén "fotoprotegidas", es decir, que no minimicen la absorción de luz especialmente durante las horas centrales del día.



5. DIFERENTES GRADOS DE PLASTICIDAD. Del estudio de la respuesta de las plantas a diferentes ambientes se infiere que cuanto más favorable es el medio, mayor es la plasticidad fenotípica de la especie adaptada al mismo. Los árboles y arbustos perennifolios de la pluviselva tropical (*Psychotria* sp Centroamérica) se mostraron más plásticos en su respuesta a la luz que sus congéneres del área mediterránea (*Quercus* sp). El índice de plasticidad varía entre cero (plasticidad nula) y uno (plasticidad máxima). En un estudio sobre coscojas (*Quercus coccifera*) de tres localidades ibéricas se comprobó una mayor plasticidad de las poblaciones de zonas húmedas. Aunque esa observación de campo admite una explicación alternativa: la heterogeneidad ambiental (mayor en la zona húmeda) es la que determina la plasticidad y no la "benignidad" ambiental. Esta mayor plasticidad se alcanzaría mediante el mantenimiento de una mayor diversidad genética de la población, no mediante un genotipo más plástico del individuo.

magnitud respecto a la primavera y el verano, mientras que menudearon las temperaturas por debajo del punto de congelación.

Las bajas temperaturas menoscabaron la actividad fotosintética de la hiedra y dañaron a los fotosistemas. Por culpa de esas graves lesiones, que tardaron semanas en desaparecer, disminuyó el rendimiento fotoquímico de las trepadoras. El aumento en la síntesis de pigmentos fotoprotectores del ciclo de las xantofilas, que se registró durante el invierno, resultó ineficaz para evitar el daño en los fotosistemas debido al brusco cambio lumínico, asociado en ese caso con temperaturas bajas que disminuyen el metabolismo en general y la fotosíntesis en particular.

Durante el verano austral, las plantas y líquenes de la tundra antártica permanecen sometidos a radiaciones solares elevadas con temperaturas próximas o por debajo del punto de congelación. Sin embargo, la eficiencia fotoquímica de los fotosistemas de los líquenes y plantas antárticos se recupera en cuanto la radiación disminuye por causa de las nubes o del movimiento aparente del sol. Esta presta recuperación revela la ausencia de daño fotoquímico apreciable en los organismos.

Si las plantas de otras latitudes en situaciones similares sufren lesiones de difícil recuperación, ¿por qué no se resienten los fotosistemas de las especies antárticas? La respuesta podría ser que estos organismos absorben una parte pequeña de la radiación incidente y una fracción importante de la que absorben la disipan en forma de calor, sin que llegue a afectar a los fotosistemas, gracias al ciclo de las xantofilas y a otros mecanismos fisiológicos. Esta forma de evitar la radiación tiene por contrapartida una baja productividad. Desventaja que no parece importar demasiado en ambientes extremos, como la Antártida, donde prima la supervivencia.

En ambientes áridos las plantas se encuentran expuestas a altas radiaciones. Allí los factores limitantes de la fotosíntesis son la sequía y las temperaturas extremas. Sometidas a esas condiciones, habituales en ecosistemas mediterráneos, la encina (*Quercus ilex*), la coscoja (*Q. coccifera*) o la sabina mora (*Juniperus phoenicea*) limitan la eficiencia fotoquímica mediante la acumulación de pigmentos fotoprotectores del ciclo de las xantofilas; en otras palabras, evitan el daño fotoquímico a cambio de un menor rendimiento fotosintético, de manera análoga a los líquenes y plantas de la tundra antártica. Los estudios de campo y laboratorio con el toyon (*Heteromeles arbutifolia*), un esclerófilo del chaparral californiano, han mostrado que la combinación de alta radiación, temperaturas sofocantes y sequía, típica del verano mediterráneo, disminuye la eficiencia fotoquímica de los fotosistemas. Sin embargo, las plantas habitualmente expuestas a altas radiaciones y sequía soportan temperaturas críticas más elevadas; para dañar los fotosistemas tienen que darse episodios agudos de calor y radiación.

La tolerancia a las radiaciones altas se alcanza no sólo mediante adaptaciones fisiológicas de las hojas, sino también a través de la arquitectura de la copa, que cela parte de la radiación incidente. En ambientes de clima mediterráneo se observan dos tipos funcionales de arquitectura. Las arquitecturas permanentes —el primer tipo— no presentan, en el decurso de las estaciones, cambios significativos de la superficie foliar ni del ángulo o la orientación de las hojas. Se aprecia esa conformación en las especies mediterráneas citadas, en leguminosas arbustivas (especies de *Retama, Cytisus* y *Spartium*) o en herbáceas perennes de los géneros *Stipa* y *Lygeum*. Exponen menos de un 30 % del área fotosintética total durante el mediodía, debido a la verticalidad de sus superficies fotosintéticas y a un importante autosombreado entre las unidades del follaje. De esta forma se evita la radiación intensa durante las horas menos productivas del día.

Por contra, las arquitecturas dinámicas, las de las jaras (*Cistus*) por ejemplo, exponen un 50 % del área foliar a mediodía, pero sólo durante la primavera. Se trata de especies que manifiestan fluctuaciones anuales en el área foliar y en el ángulo y orientación de las hojas; durante el verano pueden perder más de la mitad del follaje, y las hojas ofrecer una verticalidad mayor, que en primavera. Con ello evitan la radiación intensa durante la estación menos productiva.

Aunque las arquitecturas permanentes permiten un rendimiento sostenido a lo largo del año, no logran resultados notables a la hora de evitar el estrés lumínico. Tienen, pues, que resistir las altas radiaciones y sus efectos adversos. Las arquitecturas dinámicas, sin embargo, maximizan el rendimiento durante la estación favorable; evitan con éxito las altas radiaciones, si bien a costa de una pérdida importante del follaje.

Plasticidad fenotípica

Habida cuenta de la naturaleza cambiante de la luz y del carácter sésil de las plantas, podría pensarse que la selección primaría la máxima plasticidad del fenotipo en respuesta a la luz del entorno. La verdad es que la plasticidad fenotípica ante la luz incidente refuerza el rendimiento fotosintético. Las poblaciones californianas de toyon que viven a la sombra de encinares abiertos reciben siete veces menos radiación PAR que sus congéneres que medran en zonas abiertas. Pero las modificaciones en la arquitectura de la copa, resultado de su respuesta plástica al ambiente lumínico, determinan que la radiación absorbida sea sólo tres veces menor, y la plasticidad fisiológica reduce la diferencia de ganancia neta de carbono por día a 0,6 de la que obtienen las poblaciones de sol.

Según recientes investigaciones, las plantas podrían diferir en su plasticidad frente a la luz; no sólo en su especialización en determinados ambientes lumínicos. Para medir la plasticidad y compararla entre distintas especies, se cultivaron especímenes bajo distintos ambientes lumínicos y se registraron una serie de valores estructurales, fisiológicos y de crecimiento de cada especie en cada tratamiento de luz. Los resultados indicaron que, dentro de los arbustos siempreverdes, los de zonas tropicales húmedas eran más plásticos frente a la luz que los de zonas mediterráneas áridas. Y a su vez, dentro de cada uno de estos dos grupos, las especies o poblaciones de zonas más adversas (con algún factor ambiental más limitante que en el resto de la muestra) resultan menos plásticas que las de zonas más favorables. ¿Por qué? La pregunta es simple, la contestación no.

Plasticidad o especialización

Suele afirmarse que una especie plástica es una especie generalista. La plasticidad tiende a oponerse a la especialización. Parecería, pues, que una especie debiera optar por especializarse o por acomodarse mediante plasticidad. Y se da por supuesto que un organismo especialista, en las condiciones a las que está adaptado, es más eficiente que otro generalista. Pero la realidad es otra, en el mundo vegetal al menos. Hay plantas generalistas capaces de alcanzar el mismo rendimiento que las especialistas en las condiciones favorables a estas últimas.

Quizá la especialización no esté reñida con la plasticidad. De hecho, la especialización en ambientes favorables —bien iluminados y sin grandes restricciones hídricas o térmicas— aumenta el rendimiento cuando el organismo actúa en dicho entorno. Eso conlleva que la especie responda mejor ante un incremento en los recursos (luz en nuestro caso) que otras plantas especializadas en ambientes más adversos. Pero, ¿no es la plasticidad por igual ventajosa en ambientes favorables y adversos? Por muy variable que sea la luz en la mayoría de los ambientes y beneficioso que pudiera parecer una respuesta plástica al ambiente lumínico, la plasticidad fenotípica parece implicar unos costes y unos riesgos que, aunque difíciles de cuantificar, pueden comprometer la supervivencia del vegetal.

Una respuesta muy intensa ante un período favorable puede conducir a un fenotipo desequilibrado o muy costoso de mantener, una vez retornen las condiciones a los niveles habituales. Ahí podría residir la explicación de la moderada respuesta de las plantas de ambientes desfavorables ante un aumento temporal o espacial de los recursos. Se ha observado que una respuesta muy plástica al ambiente lumínico conlleva que los individuos acostumbrados a la sombra realicen una fuerte inversión de biomasa en la copa a expensas de las raíces, dejándolos expuestos a la desecación si el hábitat, además de oscuro, es seco. De la misma forma, una planta habituada a la sombra que invierta mucho en follaje o elongue los tallos se vuelve muy sensible a la pérdida de superficie foliar por herbivoría. A pesar de todo, si una planta no responde al sombreamiento por plantas vecinas termina eliminada en la competencia por la luz.

Las ventajas e inconvenientes de una respuesta plástica a la luz dependen de la importancia de la disponibilidad hídrica, nutrientes, competencia, herbivoría y otros factores del ambiente. El análisis ecológico y evolutivo de este complejo cuadro de interacciones está comenzando a iluminar por qué unas plantas se han especializado en aprovechar ciertos niveles de radiación, mientras que otras se acomodan sin dificultad a la radiación de cada momento.

Bibliografía complementaria

ADAPTATION TO SUN AND SHADE: A WHOLE-PLANT PERSPECTIVE. T. J. Givnish, T. *Australian Journal of Plant Physiology*, vol. 15, págs. 63-92; 1988.

THE EVOLUTIONARY BIOLOGY OF PLANTS. K. J. Niklas. The University of Chicago Press, 1997.

PHENOTYPIC EVOLUTION. A REACTION NORM PERSPECTIVE. C. D. Schlichting y M. Pigliucci. Sinauer Associates Inc., Sunderland, 1998.

HANDBOOK OF FUNCTIONAL PLANT ECOLOGY. F. I. Pugnaire y F. Valladares. Marcel Dekker, 1999.

CURIOSIDADES DE LA QUÍMICA

Roland Lehoucq y Jean-Michel Courty

Submarinismo

La máscara se adhiere a la cara, duelen los oídos. Quienes han buceado lo saben: la presión ambiente aumenta conforme uno desciende en el interior de una masa de agua (más o menos una vez la presión atmosférica cada diez metros). Así, a 20 metros de profundidad, la presión es el triple que la atmosférica (o sea, la presión reinante en la superficie del agua más la presión debida a la capa de agua). Los tejidos blandos que componen nuestro organismo se hallan adaptados a la presión ambiente. Constituidos esencialmente por materias sólidas y agua, son poco compresibles y apenas cambian de volumen durante una inmersión.

En cambio, el comportamiento del aire contenido en el sistema respiratorio es muy otro. Los gases son mucho más compresibles que los líquidos (mil veces más que el agua). A mediados del siglo XVII, el irlandés Robert Boyle y el francés Edme Mariotte enunciaron una ley para expresar esa compresibilidad: "A temperatura constante, el volumen de un gas es inversamente proporcional a la presión que sufre". Así, cuando la presión se duplica, el volumen que ocupa el gas se reduce a la mitad. Esto explica por qué desde diez metros de profundidad la máscara se aplasta contra la cara. Para salvar ese inconveniente, los buceadores equipados con botellas deben aprender a insuflar aire en la máscara a través de la nariz a medida que descienden. Para evitar los dolores de oídos a causa del exceso de presión sobre los tímpanos, soplan por las vías nasales a la vez que se tapan la nariz, para que aumente la presión en las trompas de Eustaquio (pequeños conductos que aseguran el equilibrio de la presión en los tímpanos).

Las consecuencias prácticas de la compresibilidad del aire se multiplican en la subida de retorno.



1. Con la profundidad aumenta la presión, que aplasta la nariz y oprime los tímpanos. Los buceadores se liberan de los efectos indeseables de la presión ambiente soplando dentro de sus máscaras.

Tras una espiración normal, la cantidad de aire residual en los pulmones es superior a los tres litros, y nunca inferior a 1,5 litros, incluso en una espiración profunda. En los pulmones de un buceador que sube, ese aire residual se dilata conforme disminuye la presión ambiente. Si la subida es demasiado rápida, hay riesgo de que el volumen de ese aire supere la capacidad máxima de los pulmones, del orden de los seis litros. Por ello, al ascender, los buceadores evitan bloquear la respiración; espiran sin parar, al objeto de evitar que los tejidos de los pulmones se aflojen hasta el punto de que se rompan las membranas de las células pulmonares. Este accidente, tan raro como temido, se llama sobrepresión pulmonar.

Téngase en cuenta que la dilatación del aire afecta a todas las cavidades internas, aun a aquellas cuya existencia no se sospecha. Ocurre, por ejemplo, que un empaste dental mal hecho contiene cavidades minúsculas llenas de aire. A causa del pequeño tamaño de la abertura que las une al exterior hacen falta muchos minutos, incluso decenas de minutos, para que la presión reinante dentro de una de esas pequeñas burbujas alcance la presión ambiente. Sin embargo, al cabo de 40 minutos de inmersión, por ejemplo, se alcanza ese equilibrio. Durante la subida, la presión dentro de las cavidades no tiene tiempo de equilibrarse. Entonces, la consiguiente sobrepresión dentro de las muelas crea unos dolores violentos; puede reventar la muela o expulsar el empaste.

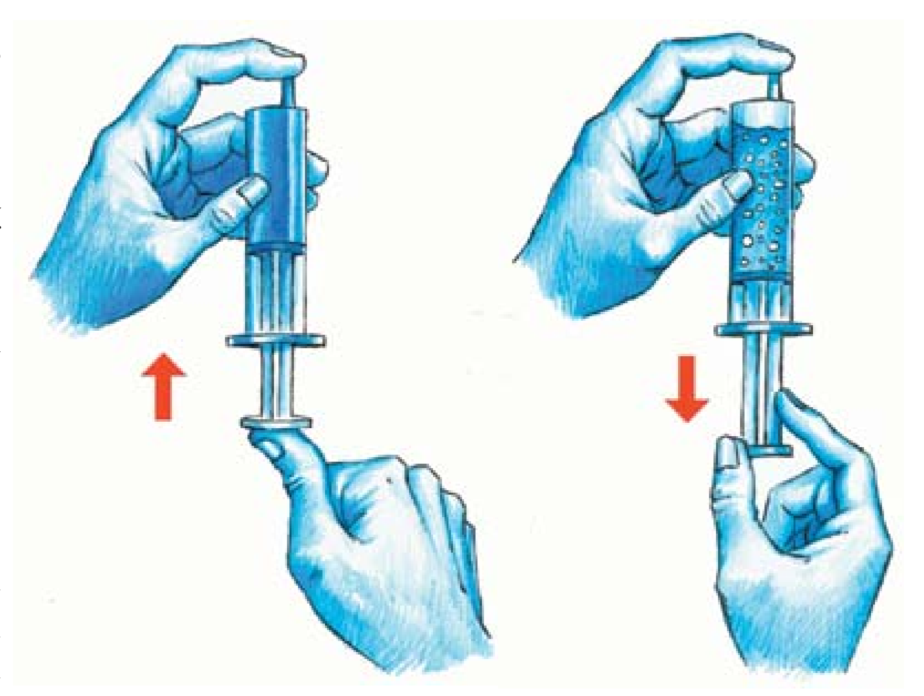
Disolución de los gases

Los gases no sólo se alojan en las cavidades, sino que también se disuelven en los líquidos. Así, en la sangre se encuentran todos los gases que componen el aire. En 1803, el británico William Henry observó que la cantidad de gas que se disuelve en un líquido era proporcional a la presión que ese gas ejercía sobre el líquido, y que la cantidad de gas que se disolvía en un líquido determinado a una presión dada dependía de las naturalezas del gas y del líquido. El agua en contacto con el aire contiene unas proporciones de oxígeno y nitrógeno distintas de sus proporciones en el aire.

Un litro de agua a la presión atmosférica contiene unos 15 miligramos de nitrógeno y 8 miligramos de oxígeno, mientras que a esa misma presión el aire contiene cuatro veces menos de oxígeno que de nitrógeno. El aire que respira un buceador sale de unas botellas, y luego pasa por el descompresor, que lo pone a la presión ambiente. Como la presión baja durante el descenso, crecen progresivamente las cantidades de oxígeno y nitrógeno que se disuelven en la sangre hasta llegar a una concentración de equilibrio. El aumento de la concentración de oxígeno en la sangre carece de consecuencias fi-

siológicas funestas, pues nuestro metabolismo lo consume en grandes cantidades. La cantidad de oxígeno necesaria es unas 50 veces superior a la cantidad total de oxígeno disuelto en la sangre a la presión atmosférica; en su mayor parte, lo transporta la hemoglobina.

En cambio, el aumento de la concentración de nitrógeno en la sangre plantea problemas. Ese gas se concentra en la sangre y en todos los tejidos orgánicos, ricos en agua. Cuando una zambullida dura mucho, se establece un equilibrio entre la presión del nitrógeno de los pulmones y la cantidad de nitrógeno disuelto en los distintos tejidos. Cuando el buceador sube, el nitrógeno en exceso vuelve progresivamente al estado gaseoso y es evacuado, poco a poco, con el tránsito de la sangre por los pulmones. Esa evacuación es progresiva y sólo pueden hacerla los pulmones y, por ello, tarda. Durante las subidas demasiado rápidas, no hay tiempo para eliminar el nitrógeno disuelto en la sangre y en los tejidos; en ambos quedan burbujas de gas atrapadas. Estas presentan el riesgo de necrosar los tejidos e, incluso mucho peor, de quedarse bloqueadas en los vasos sanguíneos, impidiendo el riego y provocando embolias. Es posible imaginar los daños causados por una descompresión tan excesivamente rápida examinando el volumen de gas liberado por una botella de champán que se desbrave. Mantenido a una presión de seis atmósferas, el champán (0,75 litros) contiene unos 10 gramos de dióxido de carbono y puede liberar más de cinco litros de ese gas en cuanto se halla a la presión ambiente.



2. Este experimento, de fácil ejecución con agua gaseada, muestra que la solubilidad de un gas en un líquido disminuye cuando baja la presión. Apretando, el agua gaseada contenida en la jeringa cuya salida se tapa (izquierda) *no libera burbujas. Cuando se baja el émbolo* (derecha)*, disminuye la presión en el agua y en ella aparecen gran número de burbujas*

Los riesgos del nitrógeno

El proceso de subida para una zambullida relativamente breve a poca profundidad requiere que el buceador ascienda menos de 15 metros por minuto (la velocidad de las pequeñas burbujas que lo rodean). En cambio, a una zambullida larga o profunda debe seguirla una o varias pausas durante el ascenso de retorno: las etapas de la descompresión. En cada una de éstas, el buceador permanece a la misma altura varios minutos, para dar tiempo a que el nitrógeno liberado en la sangre y en los pulmones sea eliminado por los pulmones. El número de etapas necesarias y su duración aparecen tabuladas en función del tiempo de permanencia bajo el agua y la profundidad.

¿Qué pasa cuando las circunstancias exigen devolver rápidamente un buceador a la superficie? Para evitar los riesgos de necrosis y embolia, el submarinista debe ser introducido imperativamente, sin tardanza, en una cámara hiperbárica, dispositivo en el cual se aumenta de manera artificial la presión, de modo que el nitrógeno se redisuelva en la sangre y en los órganos. Luego, se ejecutan etapas de descompresión progresivas, como las que se habrían hecho en el mar, para eliminar progresivamente el nitrógeno.

Aparte de esas dificultades, el nitrógeno es también peligroso por otras razones. Por encima de una cierta concentración en el organismo, resulta tóxico y provoca la "borrachera de las profundidades". En ésta, se embotan las facultades físicas e intelectuales, lo cual es peligroso, pues las reacciones de una persona sujeta a esa forma de narcosis son imprevisibles y generalmente inadaptadas. Ahora bien, más allá de 40 metros, todo buceador está más o menos narcotizado. Para eludir ese peligro, los nadadores emplean a veces nitrox como gas de buceo. El nitrox es una mezcla de oxígeno y nitrógeno, con una proporción de éste menor que en el aire. Al ser inferior el aporte de nitrógeno, el gas reducido se disuelve menos y más lentamente en los tejidos y la sangre. Por tanto, hacen falta menos etapas de descompresión. Por desgracia, hasta el mismo oxígeno se convierte en tóxico por encima de una cierta presión.

Respirar oxígeno a más de 1,6 atmósferas provoca indisposiciones graves. En la composición del aire, entra un 20 por ciento de oxígeno. Para un buceador que respire el aire de una botella, el oxígeno se hace tóxico cuando la presión ambiente llega a las ocho atmósferas, o sea, a unos 70 metros de profundidad. Para bajar más, hay que respirar alguna mezcla de poco contenido en oxígeno y nitrógeno, como el heliox, mezcla de helio y oxígeno, y también el hidreliox, compuesto de hidrógeno, helio y oxígeno.

Juan M. R. Parrondo

Juegos cuánticos

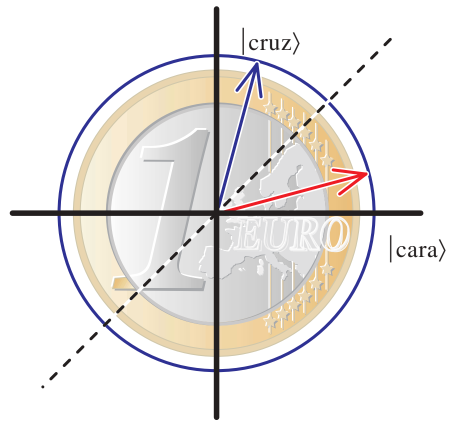
Supongo que la mayoría de los lectores de *Investigación y Ciencia* han oído hablar de la mecánica cuántica y conocen sus tres principales características: que se aplica a lo muy pequeño, que introduce el azar de forma ineludible en nuestra descripción de la naturaleza y que es sumamente extraña.

Una de las propiedades que dotan a la mecánica cuántica de ese carácter extraño es la llamada *dualidad onda-partícula*. Muchos experimentos de interferencia muestran que la luz es una onda; sin embargo, un fenómeno conocido como *efecto fotoeléctrico* no puede explicarse si no se admite que la luz tiene un comportamiento corpuscular, es decir, que se trata de un conjunto de partículas o corpúsculos. Por otro lado, las partículas que forman la materia (electrones, protones y neutrones), en la mayoría de las situaciones se comportan como corpúsculos, pero también pueden mostrar un comportamiento ondulatorio en ciertos experimentos de interferencia.

Sin embargo, ondas y partículas son cosas muy diferentes. Una onda consiste en ondulaciones de una cierta propiedad: el campo electromagnético, la presión del aire o la altura del agua en la superficie de un estanque. En estas ondulaciones la propiedad en cuestión puede tomar valores positivos y negativos en distintos puntos del espacio. Cuando una onda se encuentra con otra, los valores se suman, de modo que en los puntos en donde la primera onda es positiva y la segunda es negativa se produce una *interferencia destructiva*; esos puntos se comportan como si no existiera ninguna onda. Una partícula, por el contrario, no puede interferir destructivamente con otra: cuando se encuentra con una segunda partícula, lo único que puede hacer es chocar y volver a separarse o, si las dos partículas se atraen, formar una molécula o agregado.

¿Cómo es entonces posible que la luz, los electrones o los protones se comporten en ciertas ocasiones como ondas y en otras como partículas? ¿Cómo pueden reconciliarse en un mismo objeto estas dos naturalezas tan dispares? La mecánica cuántica resuelve el problema de la siguiente forma. El objeto —un electrón, un protón o un fotón— está descrito por la *función de onda*. La función de onda es una onda, es decir, ondulaciones de una determinada propiedad que puede tomar valores positivos o negativos. Pero esta propiedad no se parece a nada familiar: no es un campo eléctrico, ni una presión o una temperatura. De hecho, esta propiedad ni siquiera puede medirse directamente. Por ello algunos científicos y filósofos opinan que no corresponde a nada físico y que es un puro artificio matemático.

Es cierto que la función de onda no se parece a ninguna propiedad física conocida. Sin embargo, su *cuadrado*, es decir, el resultado de elevar al cuadrado el valor de la función de onda en cada punto del espacio, sí tiene un significado físico preciso: es la probabilidad de detectar al objeto en dicho punto. Si medimos la posición del objeto con una pantalla o un detector, lo encontraremos en un solo punto, es decir, la pantalla obliga al objeto a manifestarse como partícula. El lugar en donde lo encontremos es aleatorio, pero la probabilidad de que el objeto aparezca en un punto dado es igual a la función de onda al cuadrado. Por ello, el valor de la función de onda en un punto se llama también *amplitud de probabilidad*. La mecánica cuántica parece demostrar que existe un azar ineludible en la naturaleza, un azar que no puede eliminarse con un mayor conocimiento del estado de un sistema. Pero este azar tiene además propiedades sorprendentes y muy distintas de las del azar al que estamos acostumbrados en el mundo macroscópico, sobre todo cuando se combinan varios sucesos.



Así cambia la función de onda de la moneda cuando Piccard le da la vuelta: la flecha roja indica el estado cuántico de la moneda antes de la acción de Piccard y la flecha azul el estado después de la misma

¿Cuál es la probabilidad de que al tirar dos dados salga un 5? El 5 puede obtenerse de varias formas: con un 1 en el primer dado y un 4 en el segundo; con un 4 en el primero y un 1 en el segundo; con un 2 y un 3 o, finalmente, con un 3 y un 2. Si los dados no están trucados, la probabilidad de cada una de estas cuatro posibilidades es igual a 1/36 (1/6 por 1/6). La probabilidad de que salga 5 es la probabilidad de que ocurra cualquiera de las cuatro posibilidades y se calcula simplemente sumando cada una de ellas: $1/36 + 1/36 + 1/36 + 1/36 = 1/9$. De este modo se trabaja con probabilidades: la probabilidad de que ocurra un suceso que puede darse de distintas formas (todas ellas incompatibles entre sí) es simplemente la suma de las probabilidades de cada una de las formas

posibles. El lector puede aplicar esta idea y demostrar, por ejemplo, que la probabilidad de que al tirar dos monedas salgan dos resultados iguales (cara-cara o cruz-cruz) es $1/4 + 1/4 = 1/2$.

En mecánica cuántica esta sencilla regla no siempre es válida. Cuando un suceso cuántico puede ocurrir de varias formas posibles, no se suman las probabilidades, como en el caso "clásico", sino que se suman las funciones de onda o amplitudes; la probabilidad del suceso combinado se calcula como el cuadrado de esta amplitud suma. Esta nueva regla da lugar a fenómenos curiosos. Consideremos un suceso que puede darse de dos formas posibles y supongamos que la amplitud de la primera forma o posibilidad es 0,5 y la de la segunda es –0,5. Su suma es obviamente 0. La probabilidad de cada una de las formas posibles por separado es del 25 % (0,25 = 0,25) y, sin embargo, la probabilidad del suceso es 0. ¡Es como si en el problema de las dos monedas la probabilidad de que salga cara-cara fuera del 25 %, la de que salga cruz-cruz sea también del 25 %, pero fuera imposible que saliera cualquiera de las dos posibilidades! Esta afirmación parece completamente absurda y sin embargo así se comporta el mundo cuántico, por ejemplo, en un experimento de interferencia de fotones o electrones.

En la última década se ha comenzado a aplicar este insólito cálculo de probabilidades cuánticas en muchos otros ámbitos. Se habla de computación cuántica, criptografía cuántica y, recientemente, de juegos cuánticos. El primero de estos juegos fue propuesto hace dos años por David Meyer, matemático de la Universidad de California en San Diego. En él, el Capitán Piccard (personaje de la serie *Star Trek* cuyas iniciales coinciden con Classical Probability) juega contra Q (Quantum), un individuo capaz de modificar el estado cuántico de un sistema.

Veamos primero la versión clásica del juego de Meyer. Se introduce una moneda en una caja con la cara hacia arriba y se juegan a continuación tres turnos: el primero a cargo de Q, el segundo de Piccard y el tercero de Q. En cada uno de ellos, el jugador puede, sin mirar la moneda y sin que el otro jugador vea lo que hace, darle la vuelta o dejarla como está. Después de los tres turnos se abre la caja y gana Q, si la moneda presenta una cruz y P, si presenta una cara. Es fácil ver que en este juego la probabilidad de ganar es siempre 1/2 para cada jugador si P o Q deciden aleatoriamente si dan la vuelta a la moneda o no.

Pero las cosas cambian si la moneda es cuántica y las probabilidades de que se muestre cara o cruz son en realidad el cuadrado de amplitudes de probabilidad. Si a y b son las amplitudes de las posibilidades "cara" y "cruz", respectivamente, representaremos la "función de onda" o estado cuántico de la moneda en la forma:

$$a|\text{cara}\rangle + b|\text{cruz}\rangle$$

Utilizando la regla del cálculo cuántico de probabilidades, si la moneda está en este estado, la probabilidad de que veamos "cara" al abrir la caja será a^2 y de que veamos cruz, b^2. Por ello, las amplitudes tienen que verificar $a^2 + b^2 = 1$. Si representamos las amplitudes a y b como coordenadas en un plano, las posibles funciones de onda serán los puntos de un círculo de radio unidad (*el círculo azul en la figura*), ya que estos puntos verifican $a^2 + b^2 = 1$. Para ver mejor los puntos, representaremos la función de onda por un radio del círculo, como las flechas roja y azul que se muestran en la figura. El estado inicial de la moneda es o bien $|\text{cara}\rangle$ o bien $-|\text{cara}\rangle$ y, por tanto, será una flecha horizontal apuntando hacia la derecha o la izquierda.

P es un jugador "clásico", que únicamente puede dar la vuelta a la moneda o dejarla como está. Dar la vuelta a la moneda significa cambiar a por b. Un movimiento posible para Piccard es el que se muestra en la figura: la función de onda de la moneda es la flecha roja y Piccard decide voltearla; al hacerlo, el estado de la moneda pasa a ser la flecha azul. Supongamos ahora que Q puede manipular la moneda de forma no clásica. En la formulación original de Meyer, Q es capaz de girar las flechas a voluntad. Pero basta con que Q pueda hacer ciertos giros para que la ventaja frente a Piccard sea determinante. Por ejemplo, si Q puede girar la flecha 45 grados en el sentido contrario al de las agujas del reloj, entonces existe una estrategia que le dará siempre la victoria. En efecto, supongamos que el juego empieza con la flecha horizontal apuntando hacia la derecha. Lo que Q debe hacer es girarla 45 grados, de modo que el estado cuántico después de este primer turno será

$$1/\sqrt{2}|\text{cara}\rangle + 1/\sqrt{2}|\text{cruz}\rangle$$

Este estado tiene una curiosa propiedad: si Piccard da la vuelta a la moneda, la función de onda de la misma no cambiará (es como si introdujéramos en la jaula del desdichado gato de Schrödinger un gas que mata a los gatos vivos y resucita a los muertos: el estado cuántico del gato no cambiaría). Por tanto, si en el tercer turno Q vuelve a hacer el giro, entonces, sea cual sea la acción tomada por Piccard en su turno, la flecha terminará apuntando hacia arriba. Abrimos la caja y encontramos, pues, que la moneda presenta una cruz: Q ha ganado.

El juego es bastante simple y ha recibido por ello algunas críticas que argumentan que en realidad no hay ningún misterio cuántico detrás de las ventajas de Q. Ekens, del Instituto de Tecnología de California, defiende esta idea proponiendo una versión puramente clásica del juego de Meyer.

Sin embargo, todos los investigadores están de acuerdo en que los jugadores cuánticos tienen considerables ventajas sobre los clásicos, ventajas que son la base de la excepcional potencia de los ordenadores cuánticos frente a los clásicos. Por tanto, la idea de Meyer puede contribuir a dilucidar cuál es la naturaleza de estas ventajas. Por mi parte, estoy convencido de que las probabilidades cuánticas pueden dar más "juego" y que en los próximos años surgirán más ejemplos e ideas acerca del tema.

parr-km0@seneca.fis.ucm.es

Mark Fischetti

Ratones y hombres

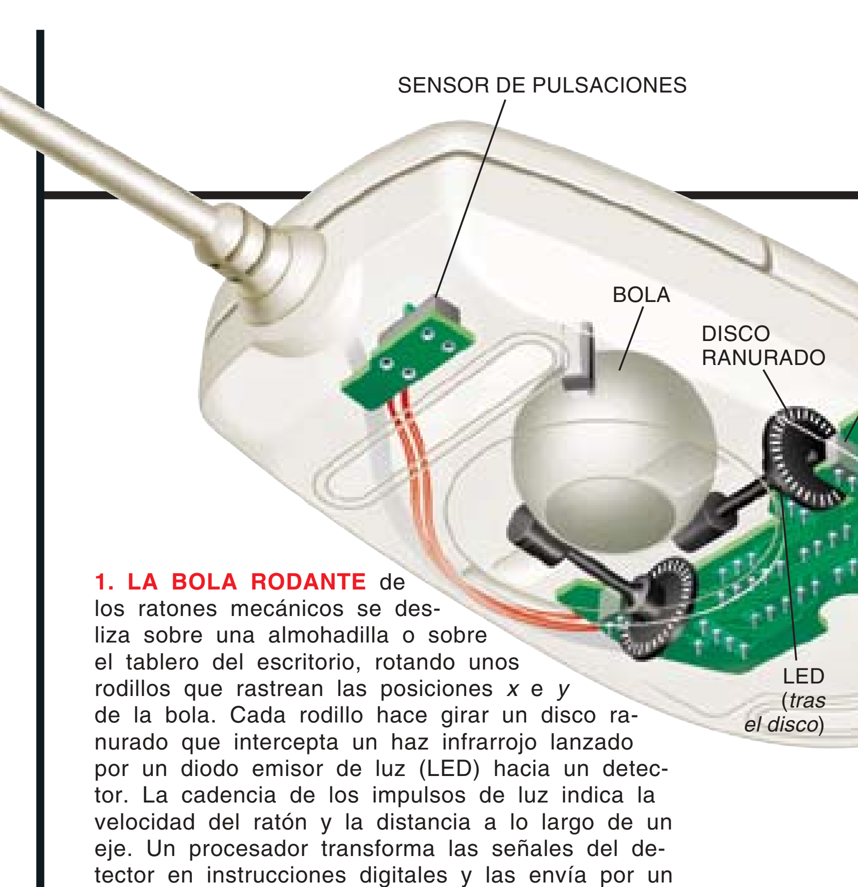
Sin el ratón, puede que millones de personas jamás hubieran tentado un ordenador ni se habrían aventurado por la Red. Esa interfaz convirtió en tangibles las potentes ideas de menús y ventanas, así como los dibujos sobre los que "apuntar y pulsar" de iconos y enlaces de Internet. Pero el invento de Douglas Engelbart, en 1968, no resonó comercialmente hasta inicios de los años ochenta, cuando apareció con los primeros ordenadores personales como el Xerox Star, el Apple y el IBM PC.

Desde entonces, tan práctico auxiliar ha lucido toda suerte de botones, ruedas y esferas. Además, su cuadrado diseño ha cedido ante unas curvas que pretenden mejorar la comodidad y aliviar la fatiga de la mano.

Durante buena parte de su evolución, el ratón no dejó de ser un útil electromecánico en el que una bola alojada en su seno rodaba sobre la mesa, mientras unos sensores transformaban el movimiento de esa bola en señales que movían un cursor. Pero a finales de los años noventa llegó el ratón óptico. En éste, una luz ilumina la superficie subyacente, y una cámara diminuta toma 1500 o más imágenes por segundo para trazar el curso de los movimientos de la criatura sobre la superficie y gobernar el cursor. Según Matt Barlow, de Microsoft, esta nueva especie sigue con más precisión los movimientos de la mano. Su mayor ventaja: no requiere limpieza. Hay una bola que recoge el polvo que pueda atascar los rodillos, haciendo que el cursor brinque o se bloquee. Asimismo, los ratones ópticos trabajan mejor sobre superficies irregulares. Algunos ratones ópticos más modernos funcionan tomando imágenes de una bola guiadora, situada en la cara superior, que el usuario mueve con los dedos.

Este año Logitech y otras firmas presentaron los ratones ópticos inalámbricos, sin cola que los una al ordenador, que incorporan unos circuitos lógicos que conectan y desconectan sus baterías en los modos de baja potencia y espera para preservar la energía incluso durante las breves pausas del usuario.

¿Y qué es esa luminosidad roja en la cara inferior de los ratones ópticos? "El rojo es el color que mejor rastrean las cámaras", afirma Barlow.



1. LA BOLA RODANTE de los ratones mecánicos se desliza sobre una almohadilla o sobre el tablero del escritorio, rotando unos rodillos que rastrean las posiciones *x* e *y* de la bola. Cada rodillo hace girar un disco ranurado que intercepta un haz infrarrojo lanzado por un diodo emisor de luz (LED) hacia un detector. La cadencia de los impulsos de luz indica la velocidad del ratón y la distancia a lo largo de un eje. Un procesador transforma las señales del detector en instrucciones digitales y las envía por un conductor al controlador del cursor del ordenador. El procesador transmite también las pulsaciones de los botones.





2. DOUGLAS ENGELBART inventó un ratón de madera y lo mostró por vez primera, con su almohadilla, el 9 de diciembre de 1968 en el Congreso de Informática de Fall Joint, en San Francisco.

¿SABIA USTED QUE...?

➤ **RATA DE AGUA:** El año pasado el Instituto Scripps de Oceanografía en La Jolla necesitaba un ratón marino para una cámara que los buzos pudieran emplear a profundidad oceánica. Jules Jaffe, experto en formación de imágenes del Scripps, sustituyó la carcasa de un ratón óptico comercial por un estuche acrílico estanco. Sustituyó también los botones cargados con resortes (que podrían ser activados por la constante presión del agua, elevada a esas profundidades) por unos cristales piezoeléctricos que generan corriente sólo cuando el buzo pulsa con el dedo unos contactos especiales y provoca un cambio en la presión ambiente.

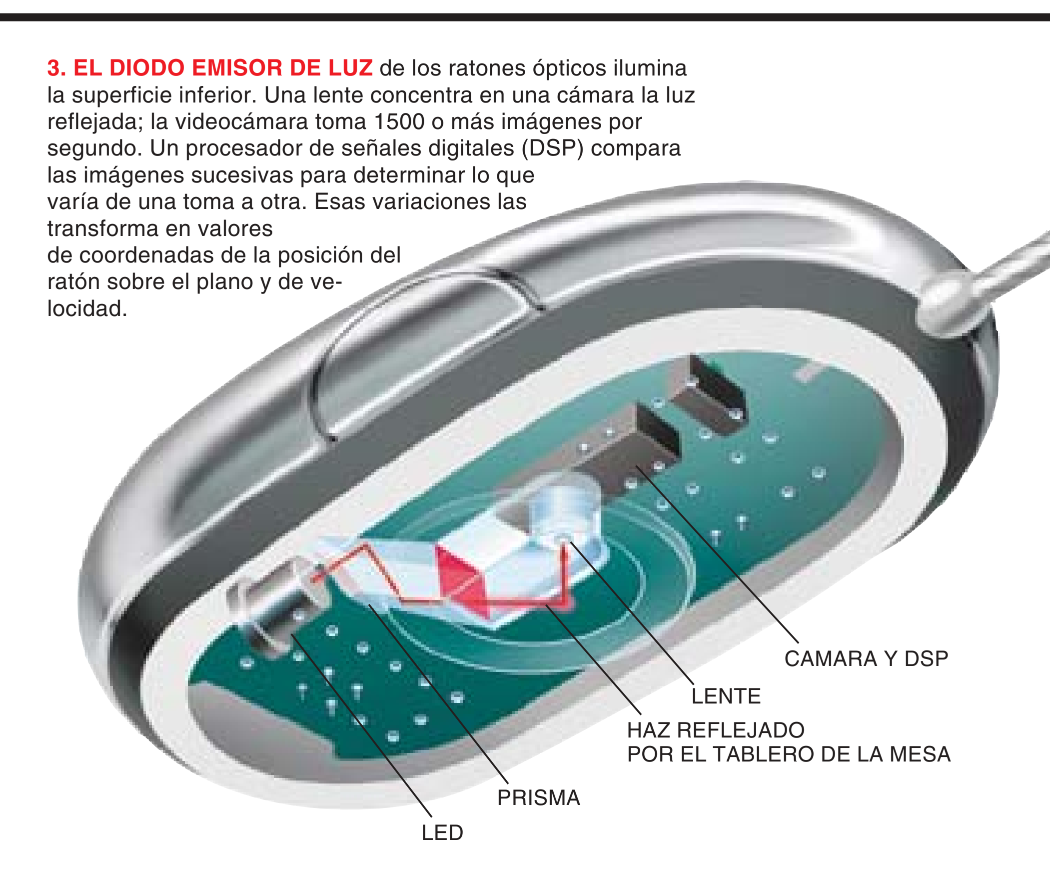
➤ **ANTICIPADO A SU EPOCA:** Douglas Engelbart ideó el ratón en el Instituto de Investigación de Menlo Park, como parte de un proyecto más amplio. En 1968 efectuó una demostración de 90 minutos del NLS ("oNLine System", Sistema en línea). Sentado ante un ordenador, con el primer ratón del mundo en su mano derecha y un teclado, similar al de un piano, de cinco teclas en su mano izquierda, procedió a abrir y reorganizar ventanas de archivos, resaltar textos, pulsar sobre hiperenlaces con documentos ubicados en ordenadores interconectados y mantener una videoconferencia. Todas esas operaciones se anticiparon largamente a los sistemas operativos basados en Windows, a los circuitos de Internet y a los hiperenlaces de la Telaraña Mundial.

➤ **LEXICO RATONIL:** Engelbart llamó a su creación "indicador de posición x-y." El apodo "ratón" se debe en parte a que el cable recuerda a una cola. Surge ahora una nueva forma verbal. Melinda Graetz, de Microsoft, al anunciar en marzo un nuevo ratón óptico, dijo que "deseábamos ofrecer la mejor experiencia posible en ratoneo".



4. EL MOVIMIENTO DEL RATON a lo largo de los ejes *x* e *y* controla las posiciones horizontal y vertical del cursor.

3. EL DIODO EMISOR DE LUZ de los ratones ópticos ilumina la superficie inferior. Una lente concentra en una cámara la luz reflejada; la videocámara toma 1500 o más imágenes por segundo. Un procesador de señales digitales (DSP) compara las imágenes sucesivas para determinar lo que varía de una toma a otra. Esas variaciones las transforma en valores de coordenadas de la posición del ratón sobre el plano y de velocidad.



1981
Xerox Star, bola rodante

1987
"Dove Bar" de Microsoft, bola rodante



2000
Trackball Explorer de Microsoft, óptico

2001
MouseMan de Logitech, inalámbrico y óptico

INDICE ANUAL

Este índice contiene los títulos de los artículos y los nombres de los autores aparecidos en Investigación y Ciencia *a partir de enero de 2001.*

MATERIAS

AUTORES

LIBROS

Optica

1604-1704

JOHANNES KEPLER. OPTICS. Traducción y notas de William H. Donahue. Green Lion Press; Santa Fe, 2000.

RENÉ DESCARTES. THE WORLD AND OTHER WRITINGS. Edición preparada por Stephen Gaukroger. Cambridge University Press; Cambridge, 1998. **DESCARTES' NATURAL PHILOSOPHY.** Dirigido por Stephen Gaukroger, John Schuster y John Sutton. Routledge; Londres-Nueva York, 2000. **DIE LICHTBRECHUNG IN DEN THEORIEN VON DESCARTES UND FERMAT,** por Klaus Weinrich. Franz Steiner Verlag; Stuttgart, 1998.

LUCE E VISIONE. THOMAS HOBBES E LA SCIENZA DELL'OTTICA, por Franco Giudice. Leo S. Olschki editore; Florencia, 1999. **ATOMISMO E CONTINUO NEL XVII SECOLO.** Dirigido por Egidio Festa y Romano Gatto. Vivarium; Nápoles, 2000.

ISAAC NEWTON'S NATURAL PHILOSOPHY. Dirigido por Jed Z. Buchwald y I. Bernard Cohen. The MIT Press; Cambridge, 2001. **RICHARD HELSHAM. A COURSE OF LECTURES IN NATURAL PHILOSOPHY.** Estudio introductorio de D. A. Attis, P. Kelly y D. Weaire. Institute of Physics-MIT; 1999.

En 1604 Johannes Kepler publica *Ad Vitellionem paralipomena, quibus astronomiae pars optica traditur*, su *Optica*. En 1704, tras veinte años de vacilaciones, dudas y correcciones, Isaac Newton entrega a la imprenta su *Opticks*. Lo que ocurrió en el siglo interpuesto fue decisivo para la ciencia moderna. No sólo porque se descubren las leyes de la refracción con Willebrord Snell y René Descartes, sino, sobre todo, porque la teoría de la luz pasó a ocupar un lugar central en la física.

Con la óptica kepleriana (*Johannes Kepler. Optics*) culmina la tradición perspectivista iniciada con los griegos, depurada por Alhazén en el siglo XI y asimilada dos centurias después por el pensamiento europeo merced al esfuerzo de Witelo, su interlocutor desde el mismo título: *Ad Vitellionem paralipomena*. Al propio tiempo, la *Optica* de Kepler inaugura el planteamiento moderno, que atiende a la fisiología y anatomía del ojo y asocia el fenómeno de la refracción a una suerte de frente de ondas, sin olvidar la formación de imágenes en las lentes.

La historia inmediata del tratado, consagrado a la naturaleza de la óptica y su aplicación a la astronomía, empezó en el verano de 1600, con la observación de un eclipse solar. ¿Por qué disminuye, inquirían los astrónomos de su tiempo, el diámetro de la Luna durante los eclipses de Sol? Kepler conjeturó el motivo por comparación con lo que sucede entre un objeto luminoso y una apertura pequeña para formar una imagen aumentada. Para abordar el problema astronómico de la refracción de la luz en la atmósfera tenía que entender primero el fenómeno de la refracción en sí misma, lo que demandaba un estudio de la naturaleza de la luz. Y para desentrañar la fiabilidad de la observación astronómica, necesitaba conocer cómo funcionaba el ojo. No había todavía telescopios.

Es la luz kepleriana una emanación inmaterial que se propaga esféricamente en un instante a partir de la fuente luminosa. Puesto que la superficie de la esfera aumenta con el radio al cuadrado, la intensidad de la luz disminuye con el cuadrado de la distancia. Kepler examina la cámara obscura y estudia las imágenes producidas por espejos planos y curvos (al ocuparse de los segundos se detiene en las secciones cónicas y en la transformación sin solución de continuidad de una recta en una hipérbola, parábola, elipse y círculo). Busca una ley que exprese la angulación a la que se refleja una imagen en un espejo y una ley que exprese el ángulo de incidencia en función del ángulo de refracción.

Asocia la refracción a un fenómeno de superficie, que ocurre en la interfase entre dos medios distintos. La superficie de un medio más denso debilita la componente paralela del movimiento de la luz incidente, doblando la luz hacia la componente normal; un medio refractor menos denso, por contra, cede mejor el paso a la componente paralela del movimiento de la luz incidente, alejándola de la normal. De ese modo la refracción se ajusta a la forma $i - i' = ni + m/\cos i$, siendo i el ángulo de incidencia, i' el ángulo de refracción y m y n dos constantes. Mejorará la expresión, en 1611, cuando dé a la imprenta su *Dióptrica*: $i = mi'$.

En 1620 hallamos a Descartes braceando en la *Optica* de Kepler (*Descartes' Natural Philosophy*, una gavilla exhaustiva de artículos sobre la física cartesiana). John A. Schuster, que ha investigado el esbozo físico-matemático que el filósofo francés pergeña con el texto y figuras del tratado kepleriano, reduce a dos sus postulados principales: 1) la "penetración" de la luz varía positivamente con la densidad del medio; 2) la luz se refracta hacia la normal en el medio más denso y lejos de la normal en el menos. Para Descartes, la refracción hacia la normal en los medios más densos no depende del debilitamiento u obstrucción de la luz incidente, como se venía admitiendo, sino que guarda relación directa con la mayor "penetración" o "generación" de la luz en dichos medios.

En su *Dioptrique*, de 1637, Descartes deducía las leyes de la reflexión y de la refracción de un modelo mecánico, esto es, del movimiento de las bolas de tenis golpeadas contra distintas superficies. Para entender la teoría dinámica

subyacente, elaborada entre 1629 y 1633, hemos de abrir las páginas de *Le Monde,* que nació en esas fechas (*René Descartes. The World and Other Writings*). De sus dos partes, el *Tratado de la luz* introducía los principios de una teoría mecanicista de la materia, óptica y cosmología, en tanto que el *Tratado del hombre* aportaba la primera fisiología asimismo mecanicista. No los publicó nunca en vida. El *Tratado de la luz* apareció en 1664 con el título *Le Monde*, el relativo al hombre dos años antes como *Renatus Descartes de Homine*. Ambos forman en verdad una sola obra, cuyo texto sometió el autor a incesante reelaboración y cuya extensión debía incluir la propia *Dióptrica*, entre otros.



Retrato de Kepler

Stephen Gaukroger resalta en su glosa los cuatro objetivos principales que debían cumplirse con *Le Monde*: la explicación mecanicista de la estabilidad de las órbitas planetarias en un mar de materia fluida que adquiere la forma de vórtice, la propagación de la luz solar mediante el efecto centrífugo de su rotación axial, la fisiología mecanicista y la psicofisiología de la percepción en los mismos términos.

Sabido es que, entre finales de 1618 y principios de 1619, Isaac Beeckman enseñó a Descartes las líneas maestras de la filosofía natural corpuscularista, familiarizándole con los conceptos de "acción" y de "tendencia al movimiento" (en la mecánica de Descartes, los cuerpos, más que moverse, muestran "tendencia al movimiento"). La materia y el movimiento se bastan para dar cuenta de los fenómenos naturales.

A propósito del movimiento, distingue entre velocidad y dirección. Ahora bien, la fuerza por la que algo se mueve y la fuerza que determina su movimiento en una dirección dada y no en otra son fuerzas distintas. Esta "determinación" depende de la fuerza del cuerpo. La configuración geométrica de otros cuerpos puede alterar esta determinación. Si las partículas componentes de los cuerpos se hallan en reposo, se requerirá una fuerza importante para separarlas, no en el caso de que se encuentran en movimiento recíproco. En la primera situación hablamos de sólidos, en la segunda de fluidos; entre ambos extremos, los demás cuerpos. Esa jerarquización del intervalo de fluidez aporta la base de la teoría cartesiana de la materia, puesto que le permite reducir las propiedades de la materia a la velocidad con que se mueven unas partes con respecto a otras. En el extremo fluido no se halla el aire, sino el fuego, cuyo grado de agitación corpuscular es tal, que hace fluidos a los otros cuerpos.

En la mecánica de fluidos se funda el modelo cartesiano de la luz, su producción, transmisión, reflexión y refracción. La luz, generada por cuerpos ígneos y transmitida a través del aire, la reflejan y refractan cuerpos térreos. El fuego, el aire y la tierra corresponden a tres tamaños diferentes de corpúsculo: muy fino, fino y grueso, respectivamente.

La luz es una tendencia al movimiento, un impulso, propagado espontáneamente a través de medios ópticos continuos. Posee, pues, una determinación. Las leyes del movimiento subyacen y explican las leyes de la refracción y reflexión de la luz. De acuerdo con el modelo de las bolas de tenis de la *Dioptrique*, la superficie reflectora se considera plana y dura: en el impacto, no absorbe fuerza de movimiento de la bola. En la reflexión, la bola de tenis viene a ser virtualmente un punto matemático en movimiento; porta una determinada cantidad de fuerza de movimiento, divisible en componentes direccionales o determinaciones. La cantidad total de su fuerza de movimiento se conserva antes y después del impacto; además, la componente de la fuerza de movimiento paralela a la superficie queda inalterada por el impacto.

En la refracción de la luz, el modelo vuelve a ser la bola de tenis que golpea una superficie, pero ahora se trata de una telilla. Aquí, como en la reflexión, se desprecian el peso, la forma y la constitución de la bola. Al atravesar la membrana, la bola pierde cierta fracción de su cantidad total de fuerza de movimiento. Esta pérdida es independiente del ángulo de aproximación. La nueva cantidad de fuerza de movimiento (sin la fracción arrebatada) se conserva durante el movimiento por debajo de la telilla y la componente paralela de la fuerza de movimiento (la determinación paralela) persiste inalterada. Pasemos a la luz: para dos medios ópticos cualesquiera, la cantidad de la fuerza de la luz en el medio incidente forma con la cantidad de la fuerza de luz en el medio refractor una razón constante, característica de los dos medios e independiente del trayecto de propagación; además, la componente de la determinación paralela a la superficie refractora no se altera con la refracción del rayo.

De ambas condiciones se obtiene la ecuación: seno de incidencia/seno de refracción = 1/constante.

Sobre el concepto de determinación del rayo luminoso polemizó Descartes con Pierre de Fermat, disputa relatada con rigor intelectual por Klaus Weinrich en *Die Lichtbrechung in den Theorien von Descartes und Fermat.* La discrepancia comenzó meses antes de la aparición de la dióptrica cartesiana. En efecto, aunque el *Discours de la Methode pour bien conduire sa raison, et chercher la verité dans les sciences. Plus la Dioptrique, les Meteores et la Geometrie qui sont essais de celle Methode* apareció en Leyden en 1637, en enero de ese mismo año envió Descartes, residente en Holanda, pliegos del volumen al padre Mersenne. Le rogaba a éste que, desde su influjo reconocido en París, le lograra el *privilège* regio. Con los pliegos iban, por lo menos, los dos primeros capítulos de la *Dioptrique*. Mersenne pasó el encargo a Beaugrand, en aquellas fechas *secrétaire du roi*. Tras recibir los pliegos, Beaugrand se los entregó a su amigo Fermat para que emitiera un juicio sobre los mismos en brevísimo tiempo. Mersenne supo por el propio Fermat de esa lectura.

Ante la interpretación de la determinación como movimiento real o como simple dirección opta Fermat por considerarla lo segundo. La opinión de Descartes sobre la proporción de la refracción, sentencia Fermat, es muy cierta, pero sus demostraciones están plagadas de saltos y paralogismos. Para hacer bueno el argumento de Descartes sería preciso que la bola no perdiera nada de su determinación, ni de su fuerza; he ahí un ejemplo de paralogismo. Para paralogismos, replica Descartes, los de Fermat, cuando le atribuye, lo que él jamás ha dicho, que la determinación de la bola no mengüe en la velocidad.

Fermat defendía que los rayos luminosos tomaban las trayectorias que requerían un tiempo mínimo. Supuso que la velocidad de la luz en un medio más denso era menor que en un medio menos denso en una razón inversa de los índices de refracción. Frente a la explicación corpuscular cartesiana, Fermat opta por una exposición geométrica.

Mersenne fue también avalador en París de Thomas Hobbes (*Luce e Visione. Thomas Hobbes e la Scienza dell'Ottica*), cuya doctrina mecanicista de la luz no pareció importarle mucho al autor de la *Dioptrique*. Descartes, como muchos científicos de su tiempo, no mostró aprecio por los trabajos de Hobbes sobre óptica. Había éste empezado a ocuparse de la filosofía natural hacia 1630. Se concentró primero en el origen de las sensaciones. Y, puesto que, de acuerdo con la tradición precedente, la vista constituía el más noble de los sentidos, comenzó con la visión. Redacta su primer esbozo, *Short Tract*, donde expone los rudimentos de una teoría mecanicista de la luz y proyecta la gran división de la óptica del Seiscientos: la óptica de transmisión material, a la que se adhiere en el *Tract*, y la del continuo, que abrazará a partir de 1636.

Mersenne le publica en 1644 su *Tractatus opticus* I, estructurado de forma geométrico-deductiva. Ofrece aquí una deducción de la ley del seno, que depura y completa en *Tractatus opticus* II y en *A Minute or First Draught of the Optiques*. Aunque obvia la influencia de la *Dioptrique* cartesiana en la obra del inglés, no debe quedar en segundo plano la ejercida por la *Optica* de Kepler. Hobbes formuló hasta tres teorías diferentes sobre la propagación de la luz: una primera emisionista y, continuistas, las otras dos. La teoría de la emisión implicaba en él rechazar el recurso a la transmisión del movimiento a través del medio.

Partiendo de los principios del mecanicismo y de la experiencia de la propagación de la luz en todas las direcciones, en el *Tractatus*

Ovario poliquístico

Polycystic Ovary Syndrome. Dirigido por Gabor T. Kovacs. Cambridge University Press; Cambridge, 2000.

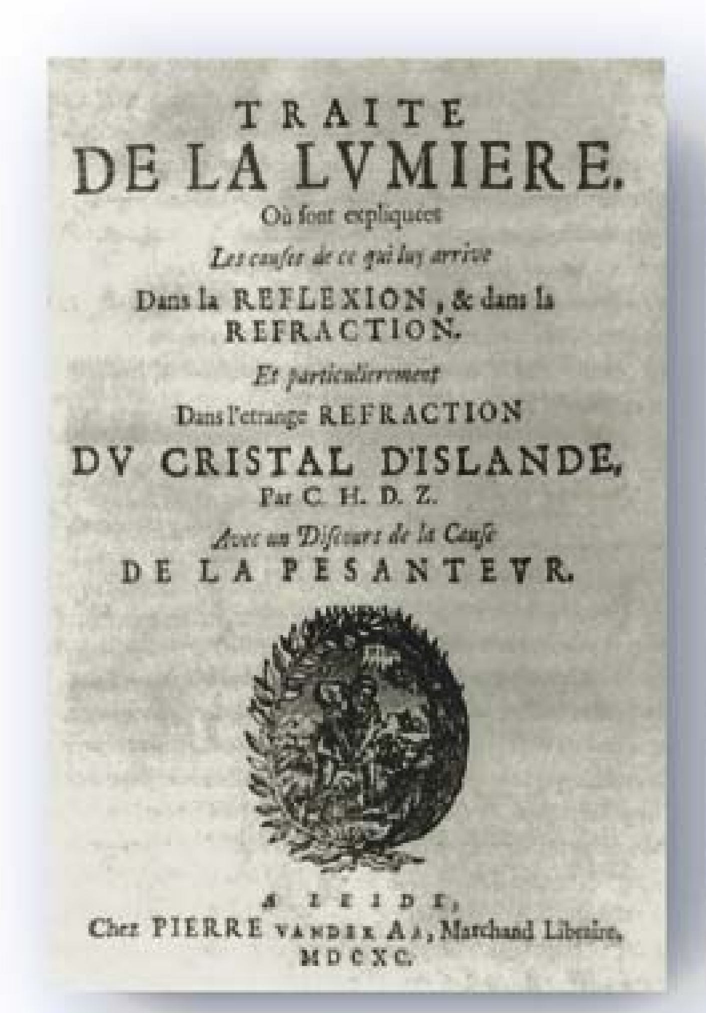
El ovario poliquístico es una de las alteraciones más frecuentes de la medicina de la reproducción en la mujer. Aunque sólo fuera por eso, hemos de agradecer a Gabor Kovacs que haya seleccionado un grupo altamente cualificado de expertos para escribir una monografía sobre el síndrome del ovario poliquístico.

El ovario poliquístico es un diagnóstico ecográfico que es relativamente fácil de observar. En ocasiones el síndrome presenta alteraciones clínicas —trastornos de la regla, subfertilidad e hirsutismo—y trastornos bioquímicos, como la elevación de la LH (hormona luteinizante). Cuando se imbrican los hallazgos ecográficos con los clínicos y los bioquímicos hablamos de síndrome del ovario poliquístico.

Actualmente se está investigando en el campo de la genética. Se trata de un tipo de herencia autosómica dominante; cierto locus del gen de la insulina podría ser el responsable: P450scc (CYP11a). Se especula sobre la susceptibilidad de estas mujeres para desarrollar una diabetes, una aterosclerosis, o ambas, a lo largo de su vida. Sabemos que las afectadas tienen un riesgo mayor de padecer un cáncer de endometrio.

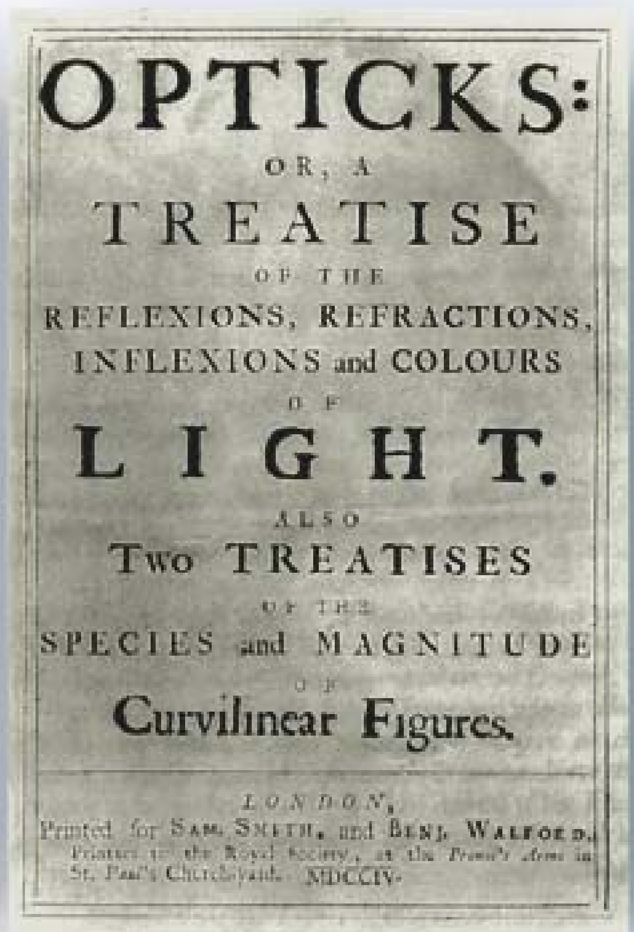
Las manifestaciones dermatológicas del síndrome pueden ser variopintas, como el acné, el hirsutismo, la alopecia androgénica y, mucho menos frecuente, la acantosis nigricans.

El capítulo 9 trata de establecer una serie de medidas higiénico-dietéticas que pueden tener importancia en el desarrollo de la enfermedad. Se mencionan el control de la obesidad, intolerancia a la glucosa, tabaco, alcohol y otros, antes de recurrir a tratamientos inductores de la ovulación. De la inducción de la ovulación se resalta su eficacia para la propia ovulación y para conseguir un embarazo, aunque importa utilizar las dosis más bajas que consigan una buena ovulación unifolicular. Reviste particular interés el capítulo 11, que versa sobre el tratamiento. —Xavier Iglesias



TRAITE
DE LA LVMIERE.
Où sont expliquées
Les causes de ce qui luy arrive
Dans la REFLEXION, & dans la
REFRACTION.
Et particulierement
Dans l'etrange REFRACTION
DV CRISTAL D'ISLANDE,
Par C. H. D. Z.
Avec un Discours de la Cause
DE LA PESANTEVR.

A LEIDE,
Chez PIERRE VANDER AA, Marchand Libraire,
MDCXC.



OPTICKS:
OR, A
TREATISE
OF THE
REFLEXIONS, REFRACTIONS,
INFLEXIONS and COLOURS
OF
LIGHT.
ALSO
Two TREATISES
OF THE
SPECIES and MAGNITUDE
OF
Curvilinear Figures.

LONDON,
Printed for SAM. SMITH, and BENJ. WALFORD,
Printers to the Royal Society, at the *Prince's Arms* in
St. Paul's Church-yard. MDCCIV.

Las portadas del Traité de la Lumière *de Huygens y de la* Opticks *de Newton aparecieron sin el nombre de su respectivo autor*

opticus I establece la naturaleza oscilatoria del movimiento que causa la visión. La luz consiste en un movimiento de dilatación (diástole) y de contracción (sístole) que se propaga a través de la acción del medio. Sustituye el modelo de sístole y diástole en el *Tractatus opticus* II por el "motus cribrationis", el modelo de la criba o cedazo: un movimiento circular simple. El hecho de que la distinción metodológica entre ciencias demostrativas y ciencias naturales aparezca al principio del *Tractatus opticus II* implica que también la óptica debe utilizar un procedimiento heurístico de tipo hipotético. La parte de la óptica que se propone explicar la naturaleza de la luz, la génesis de los colores y la visión es un procedimiento heurístico y probabilístico, en tanto que cuando aborda las leyes de la transmisión de la luz se funda en la geometría o mecánica del movimiento.

A Francesco Grimaldi (1618-63) correspondería en el segundo tercio del siglo XVII desentrañar el tercer fenómeno óptico por excelencia, el de la difracción, o desviación de las ondas al atravesar una abertura o al rodear el borde de una barrera (*Atomismo e Continuo nel XVII Secolo*). Igual que otros contemporáneos suyos este científico jesuita remite la propagación de la luz y la naturaleza de los colores a una sola teoría física, la de la estructura íntima de la materia.

En su póstuma *Physico-Mathesis De Lumine* (1665) se muestra convencido de que la luz no sólo se propaga en línea recta (reflexión o refracción), sino también ondulante (difracción). Rechaza, en ese contexto, que la luz fuera algo inmaterial: lo que los peripatéticos de su tiempo suponían un accidente de los cuerpos diáfanos que se difundía por movimiento local. Para Grimaldi la luz era una sustancia corpórea sutilísima, un fluido propagado con un ímpetu penetrante. ¿De qué naturaleza?

Dos propiedades caracterizaban a las partículas componentes de los cuerpos sólidos: la continuidad y la conservación de su ordenación originaria durante el movimiento, debido a la rigidez constitutiva de dichas partículas. En el fluido en movimiento persistía, sin embargo, sólo la continuidad; no se conservaba la ordenación de las partículas, de modo que éstas podían intercambiarse de lugar.

En el choque contra un obstáculo, los sólidos rebotaban; las partículas que en el camino hacia el obstáculo iban delante, en el rebote ocupaban las últimas posiciones. En los fluidos, la primera partícula invertía su movimiento tras el rebote y continuaba ocupando la primera posición. Bajo la acción de los rayos solares, las partículas de luz podían salvar así

un obstáculo opaco. Además, las partículas del fluido no portaban todas la misma velocidad; las que ocupaban la parte central, dotadas de una mayor cohesión, se movían juntas y más céleres que las situadas en los márgenes.

La presencia de bandas luminosas de distinto color demostraba que la luz no se difundía de un modo uniforme por toda la superficie iluminada, sino con diferentes grados de intensidad. Longitud y luminosidad de las franjas eran, en efecto, función de su distancia de la sombra.

No parece que Newton conociera de primera mano el trabajo de Grimaldi (*Isaac Newton's Natural Philosophy*, estado actual de la investigación sobre su pensamiento y obra) cuando, diez años después de estas reflexiones, publicó su disputado artículo sobre la luz y los colores. Tan contrariado quedó, que se propuso no publicar nada más sobre óptica. Venturosamente cambió de opinión.

A través de una aparente inquisición menor —¿por qué no aparece su nombre en la página de portada de la *Opticks*?— I. B. Cohen recrea los avatares de la forma y el contenido de la segunda obra maestra de Newton. Lo hace en páginas brillantes de un trabajo historiográfico modélico, que, digamos de paso, debería servir de enseñanza para los que se inician en historia de la ciencia. Arranca de la comparación entre la *Opticks* newtoniana y el *Traité de la Lumière* de Huygens (1690).

La página del título de la primera edición de la *Opticks* (Londres, 1704) omite, en efecto, el nombre del autor. ¿Se perdió involuntariamente en el proceso de impresión? ¿Lo suprimió Newton de intento? En busca de la respuesta Cohen rastrea la evolución de la óptica newtoniana. También el *Traité de la Lumière* de Huygens apareció anónimo. Newton tomó por modelo el libro de Huygens, con el que estaba familiarizado y a cuyo autor admiraba.

Publicados los *Principia*, se decidió redactar un tratado sobre óptica en latín, siguiendo el mismo patrón. Serían, en su deseo inicial, unos *Fundamenta Opticae*. La materia, sin embargo, se le resistía. No acertaba a elaborar una doctrina matemática satisfactoria que explicara los fenómenos de difracción. De hecho, el resultado final, la *Opticks*, concluye con una serie de cuestiones abiertas, sin corolarios.

Aunque no logró matematizar la ciencia de la luz y el color, hazaña conseguida con la mecánica en los *Principia*, no puede decirse que la *Opticks* sea un libro puramente cualitativo. Aunque se basa en medición y cálculo, no procede demostrando sus proposiciones mediante técnicas matemáticas. Lo mismo que el *Traité* de Huygens, escrito también en lengua vernácula, aborda la óptica física, no la óptica geométrica tradicional, las propiedades de la luz, no la dióptrica.

De las dificultades de Newton con la difracción se ocupa Alan E. Shapiro, quien reseña los experimentos acometidos para obtener las leyes cuantitativas que gobiernan el fenómeno y demostrar la existencia de fuerzas de corto alcance entre luz y materia. En sus primeros escarceos desarrolló un modelo de difracción que suponía que las trayectorias de las franjas eran idénticas a, o coincidían con, las trayectorias de los rayos que las producían. Cuando descubrió que no había tal, se sintió sin fuerzas para reanudar el camino. Por eso, indica Shapiro, la *Opticks* languidece inacabada hasta finales de 1702 o 1703, cuando reescribe la breve sección sobre la difracción y añadió las cuestiones.

Reelaboró entonces los pasajes que se fundaban en el modelo de propagación lineal, los cálculos de la distancia de los puntos de inflexión desde el corte de difracción y las leyes que los gobiernan. Introdujo una ilustración de la difracción por un cabello que mostraba el entrecruzamiento de los rayos, de suerte que las trayectorias de las franjas no eran las mismas que las de los rayos.

Los *Philosophiae naturalis principia mathematica* y la *Opticks* constituyeron los pilares de la ciencia moderna. No sólo resolvían los problemas del movimiento de los planetas, de la caída de los cuerpos, las mareas y la relación entre los colores y la luz blanca, sino que introdujeron también leyes matemática simples y preceptos metodológicos que prometían acercarnos a nuevos descubrimientos. Pero estaban escritos en un nivel accesible para muy pocos. Para extender su conocimiento se va generando un alud de escritos divulgadores en el que sobresale *A Course of Lectures in Natural Philosophy* de Richard Helsham.

Helsham, que nació en torno a 1682, se graduó en el Trinity dublinés, donde se enseñaba Descartes, Gassendi, Malebranche y Locke. El mismo comenzó a dar clases de filosofía natural y experimental, así como de matemáticas. Su sucesor, y antiguo alumno, Bryan Robinson las publicó póstumamente en este manual que alcanzaría hasta ocho ediciones. A diferencia de otros textos newtonianos de primera hora, la obra de Helsham va dirigida a los alumnos universitarios no al público general. Resume pruebas matemáticas complicadas y añade experimentos sencillos. Puesto que el propósito de la educación en la universidad del siglo XVIII era poner de manifiesto la obra de Dios en la naturaleza, el *Course* de Helsham constituyó un elemento perfecto de la educación diseñada para la formación del clero.

Aunque no todos los contemporáneos compartían la física newtoniana basada en partículas y fuerzas, dado el supuesto carácter oculto de estas últimas, Helsham se limita a establecer que la naturaleza puede dividirse en principios activos y pasivos, siendo la atracción y la repulsión principios activos y la inercia principio pasivo. Por lo que respecta a la luz, la presenta como un fluido sutil constituido por partículas de distintos tamaños, que emiten los cuerpos luminosos mediante movimientos de vibración. Interesado por la explicación newtoniana del espectro, aporta también una descripción detallada de la anatomía del ojo. Al presentar la doctrina newtoniana como algo acabado y racional, sin fricciones ni antagonismos, contribuye a asentar su difusión entre profesores y alumnos.

—LUIS ALONSO

AVENTURAS PROBLEMÁTICAS

Dennis E. Shasha

Las coronas del Minotauro

En los primeros tiempos de la vida del feroz Minotauro (ser fabuloso, mitad hombre, mitad toro), el rey Minos de Creta se dirigió así a tres jóvenes prisioneros que compartían una celda en el exterior del Laberinto construido por Dédalo: “Sabéis que si lucháis desarmados contra el Minotauro, moriréis. Me propongo, por ello, ofreceros una oportunidad de salir con vida. Os separaré, os vendaré los ojos y adornaré vuestras cabezas, ora con una corona roja, ora con una azul. En cada caso, elegiré el color lanzando una de mis preciosas monedas cretenses, que podéis suponer justas. Después os colocaré en tres lugares equidistantes de mi hermoso estadio.

”Estaréis rodeados por una pantalla que permitirá ver a vuestros compañeros, y a ellos, la corona que lleváis. La pantalla impedirá que podáis enviar o recibir señal alguna; además, un guardia situado a vuestro lado os cortará la cabeza si lo intentáis. No podéis, pues, comunicaros entre vosotros una vez que estéis en el estadio. En ese momento, mandaré a los guardias que os descubran los ojos.

”He aquí mi propuesta: cada uno de vosotros dispondrá de 10 segundos para decir al guardia si la corona que lleva es ‘azul’ o ‘roja’; si quiere, puede decir ‘paso’. Al cabo de 15 segundos, el guardia de quien haya acertado el color de su corona hará una seña afirmativa con los pulgares; si ha errado, el guardia hará una seña negativa, y si pasa, el guardia no hará gesto alguno. Si los tres decís ‘paso’, iréis derechamente al Minotauro. Si todos quienes no digan ‘paso’ han acertado, todos quedaréis libres. Pero si yerra alguno de quienes no pasan, vuestro destino es de nuevo el Minotauro. Nadie intente hacer señas a los demás, pues el destino de quienes sigan con vida seguirá siendo el Minotauro.”

(Ejercicio preliminar: ¿Qué probabilidad hay de que los prisioneros ganen todos si todos optan por apostar? Respuesta: Solamente 1/8, pues cada uno tiene probabilidad 1/2 de errar en su intento.)

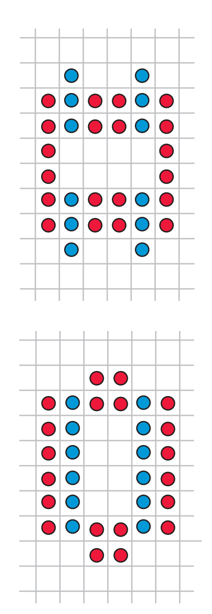
“Ahora bien”, prosiguió el rey, “tal vez se os ocurra que tenéis un cincuenta por ciento de probabilidades de salvaros designando a uno de vosotros para que haga de adivino. Pero si sois listos, os daréis cuenta de que podéis diseñar una estrategia que os dará una probabilidad 3/4 de ganar.” Tal estrategia entraña dejar preestablecida una regla, que cada prisionero ha de seguir, y exige que no haya comunicación entre ellos una vez que estén en el estadio. ¿Qué regla es ésa?

La estrategia se puede modificar, de manera que cada prisionero pueda “apostar” cero o más puntos sobre el color de la corona que lleva puesta. El equipo de prisioneros gana o pierde otros tantos puntos según que el apostante acierte o no; el equipo de prisioneros gana si el total de puntos ganados es más que el de los perdidos. Tal vez mejore así la probabilidad de que los prisioneros salgan libres. ¿Podrán los lectores idear un tal regla?



Solución del problema del mes pasado:

Los bailarines se mueven por etapas desde su configuración inicial hasta estas dos situaciones:



Los danzantes pueden alcanzar ahora la configuración final en un paso más.